

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа ВВЭР

УДК 621.039.512:621.039.577

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Говорухин В.А.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Киселева Е.С.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Томск – 2020 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

Бычков П.Н.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Говорухину В.А.

Тема работы:

Нейтронно-физический расчёт ядерного реактора типа ВВЭР

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none">– Тип реактора: ВВЭР– Тепловая мощность реактора: 1000 [МВт]– Ядерное горючее: UO_2– Обогащение топлива по U-235: 1,8 [%]– Теплоноситель: H_2O– Температура теплоносителя на входе: 248 [°C]– Температура теплоносителя на выходе: 278 [°C]– Материал оболочек твэлов и кассет: Zr
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none">– Выбор конструктивной схемы– Расчёт «холодного» состояния реактора– Оптимизация параметров реактора– Расчёт «холодного и горячего» состояний реактора в программе WIMS-D5B– Сравнение результатов

Перечень графического материала	<ul style="list-style-type: none"> – Презентация – Сборочный чертеж – Спецификация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Киселева Е.С.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:	
1 Особенности конструкций реактора ВВЭР	
2 Нейтронно-физические параметры критического стационарного ядерного реактора	
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	
4 Социальная ответственность	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A6B	Говорухин В.А.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Говорухину В.А.

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерная физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	– 30% премии; 20% надбавки; 30% районный коэффициент.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Организация и планирование работ	– Провести SWOT-анализ.
2. Расчет сметы затрат на выполнение проекта	– выявить структуру работ и их исполнителей; – определить трудоемкость проводимых работ; – разработать график проведения исследования; – рассчитать размер бюджета исследования.
3. Оценка экономической эффективности	– оценить экономическую эффективность проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Матрица SWOT
2. Бюджет проведения НИ
3. Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Киселева Е.С.	К.Э.Н.		27.04.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Говорухин В.А.		27.04.2020

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Говорухину В.А.

Школа		Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа ВВЭР

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа ВВЭР; Область применения – атомная энергетика.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы; – ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность; – пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.1.004-91.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– вредные факторы производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, излучение и психофизиологические нагрузки); – опасные факторы производственной среды (электрической природы).
3. Экологическая безопасность:	– анализ воздействия АЭС на окружающую среду.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– выбор и описание возможных ЧС на АЭС; – анализ типичной ЧС: пожар на рабочем месте; – превентивные меры и порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		27.04.20

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Говорухин В.А.		27.04.20

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) 14.03.02. Ядерные физика и технологии

Уровень образования высшее

Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

Период выполнения (весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.04.2020	Выдача задания	
30.04.2020	Выбор конструктивной схемы	
02.05.2020	Расчёт «холодного» состояния реактора	
03.05.2020	Оптимизация параметров реактора	
08.05.2020	Расчёт «горячего» состояния реактора в программе WIMS-D5B	
10.05.2020	Сравнение результатов	
06.06.2020	Сдача работы	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.

P8	<p>Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).</p>
P9	<p>Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.</p>
P10	<p>Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.</p>
P11	<p>Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.</p>
P12	<p>Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства</p>

	<p>для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.</p>
P13	<p>Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;</p>
P14	<p>Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.</p>
P15	<p>Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.</p>

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 105 с., 23 рис., 20 табл., 30 источников, 5 прил., 1 чертеж.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, отравление, выгорание, нейтронно-физический расчёт, многогрупповой расчет.

Объектом исследования является: водо-водяной энергетический реактор, тепловая мощность 1000 МВт, топливо UO_2 с обогащением 1,8 %, теплоноситель – вода.

Цель работы – определение основных нейтронно-физических характеристик реактора типа ВВЭР тепловой мощностью 1000 МВт.

В ходе исследования произведен предварительный расчёт геометрических размеров активной зоны и скорость теплоносителя, нейтронно-физический расчёт «холодного» состояния реактора, расчёт «холодного» и «горячего» состояний реактора и длительность кампании с применением программы WIMS-D5B. Также исследовано влияние стационарного отравления ксеноном,

Оценена финансовая составляющая, а также влияние вредных и опасных факторов, связанных с выполнением данной работы.

Область применения: ядерная энергетика.

Обозначения и сокращения

АЭС – атомная электростанция;

КМ – конструкционные материалы;

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

ЯР – ядерный реактор;

ЯЭУ – ядерно-энергетическая установка;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

Твэл – тепловыделяющий элемент;

ТН – теплоноситель;

СУЗ – система управления и защиты;

ТЭР – температурный эффект реактивности;

ТКР – температурный коэффициент реактивности;

WIMS – Winfrith Improved Multigroup Scheme;

МЧС – министерство чрезвычайных ситуаций;

ПЭВМ – прикладная электронно-вычислительная машина.

Содержание

Обозначения и сокращения.....	11
Введение.....	15
1 Особенности конструкций реактора ВВЭР.....	17
1.2 Тепловыделяющие элементы ядерного реактора	18
1.3 Ядерное топливо.....	18
2 Нейтронно-физические параметры критического стационарного ядерного реактора.....	19
2.1 Предварительный тепловой расчет	19
2.2 Физический расчет реактора.....	23
2.3 Гомогенизация.....	27
2.3.1 Гомогенизация первого вида	28
2.3.2 Гомогенизация второго вида.....	29
2.4 Расчет коэффициента размножения в бесконечной среде.....	31
2.4.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах.....	32
2.4.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов.....	33
2.4.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе	35
2.5 Расчет эффективного коэффициента размножения.....	35
2.6 Оптимизация параметров ячейки	37
2.7 Температурные эффекты реактивности.....	40
2.7.1 Коэффициент размножения «горячего» реактора	41
2.8 Отравление ядерного реактора.....	43
2.8.1 Стационарное отравление ядерного реактора Xe^{135}	44
2.8.2 Стационарное отравление ядерного реактора Sm^{149}	47

2.9	Расчет в программе WIMS-D5B	50
2.9.1	Расчет «холодного» реактора.....	50
2.9.2	Расчет «горячего» реактора	54
2.9.3	Расчет гомогенного «горячего» реактора.....	57
2.10	Сравнение полученных данных.....	60
3.1	Организация и планирование работ	61
3.2	Продолжительность этапов работ	62
3.3	Потенциальные потребители результатов исследования	65
3.4	Анализ конкурентных технических решений	66
3.5	SWOT-анализ.....	68
3.6	Расчёт накопления готовности проекта	71
3.7	Расчёт сметы на выполнение проекта.....	73
3.7.1	Расчёт затрат на материалы	74
3.7.2	Расчёт заработной платы.....	75
3.7.3	Расчёт затрат на страховые взносы	76
3.7.4	Расчёт затрат на электроэнергию	76
3.7.5	Расчёт амортизационных расходов	78
3.7.6	Расчёт прочих расходов.....	78
3.7.7	Расчёт суммарной себестоимости разработки	79
3.7.8	Расчёт прибыли	80
3.7.9	Расчёт НДС	80
3.7.10	Цена разработки проекта.....	80
3.7.11	Оценка экономической эффективности проекта	80
4	Социальная ответственность	82
4.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	82

4.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	82
4.1.2 Организация рабочего места исследователя	83
4.2 Производственная безопасность.....	86
4.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	86
4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия вредных факторов на исследователя	87
4.2.3 Электробезопасность	89
4.3 Экологическая безопасность.....	90
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	91
4.4.1 Чрезвычайные ситуации на АЭС.....	91
4.4.2 ЧС на рабочем месте исследователя	92
Заключение	94
Список использованной литературы.....	96
Приложение А	99
Приложение Б	100
Приложение В.....	102
Приложение Г	103
Приложение Д.....	104

Введение

На сегодняшний день энергия, получаемая посредством деления тяжелых ядер, занимает серьезную долю всей энергии, вырабатываемой на электростанциях в России и мире. Ядерная энергетика является наиболее экологичной по сравнению с традиционной энергетикой, в которой принято сжигать органическое топливо. А также энергия, получаемая на АЭС, имеет относительно невысокую цену.

Но помимо множества плюсов, которые несет ядерная энергия, есть ряд минусов, которые нельзя игнорировать. Некоторые из них это то, что многократно увеличивается ответственность за оборудование в целом, его предварительный расчет, создание ЯЭУ и дальнейшая ее эксплуатация. При регламентированном использовании реактора, он является безопасным для людей и окружающей среды, но существует риск непредвиденных ситуаций, вызванных как по вине людей, так и по недостаткам конструкции, которые могут повлечь за собой очень серьезные последствия. Поэтому особо важным является недопущение ошибок в расчетах и учет всевозможных параметров и ситуаций.

Заключение о возможности проектирования реактора, независимо от его типа, обогащения, теплоносителя, замедлителя, можно сделать только после детального как нейтронно-физического, так и теплогидравлического расчетов, включающих в себя большую базу данных о состоянии реактора в стационарном или не стационарном состоянии, что необходимо для обеспечения безопасной эксплуатации энергетической установкой.

Цель данной работы: нейтронно-физический расчет реактора типа ВВЭР тепловой мощностью 1000 МВт, в связи с чем были поставлены следующие задачи:

- расчет бесконечного и эффективного коэффициентов размножения для горячего состояния реактора;

- оптимизация элементарной ячейки для достижения наивысшего значения бесконечного коэффициента размножения;
- расчет кинетики изменения бесконечного коэффициента размножения от энерговыработки;
- расчет нейтронно-физических характеристик с использованием программы WIMS-D5B;
- анализ полученных результатов.

1 Особенности конструкций реактора ВВЭР

Реактор ВВЭР-1000 совместно с турбогенератором используется для производства электроэнергии и является составной частью энергоблока АЭС. Назначение реакторной установки – выработка сухого насыщенного пара для турбогенераторной установки, где тепловая энергия пара преобразуется в электрическую [1].

Реактор представляет собой вертикальный цилиндрический корпус с эллиптическим днищем, внутри которого размещается активная зона и внутрикорпусные устройства. В активной зоне расположены 163 ТВС шестигранной формы, каждая из которых включает в себя 312 ТВЭлов диаметром 9,1 мм, 18 направляющих каналов и 15 дистанцирующих решеток [2]. Номинальная тепловая мощность реактора составляет 1000 МВт.

Регулирование реактивности производится с помощью органов регулирования, которые изготовлены из поглощающего нейтроны материалов и в зависимости от глубины введения, препятствуют цепной реакции. Регулирование осуществляется также изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе [3].

ВВЭР обладает следующими достоинствами:

- удачное использование воды в качестве теплоносителя и замедлителя;
- доступность и дешевизна воды, а также отработанные технологии по ее получению;
- наличие высокой замедляющей способности, а, следовательно, высокое энерговыделение с единицы объема;
- высокая степень внутренней устойчивости благодаря отрицательному плотностному коэффициенту реактивности.
- вода как теплоноситель эффективно отводит тепло.

Недостатки реактора типа ВВЭР, обусловленные в основном водой:

- относительно высокое поглощение нейтронов водой, а поэтому

- должно использоваться только обогащенное топливо;
- возможность неравномерного распределения энерговыделения, из-за сильного замедления нейтронов в воде;
- коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуокиси урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов увеличивает затраты на эксплуатацию;
- высокое давление при энергетически приемлемых температурах.

1.2 Тепловыделяющие элементы ядерного реактора

Твэл ядерного реактора ВВЭР-1000 – это полностью погруженная в воду трубка, заполненная спрессованными таблетками двуокиси урана с низким обогащением, которая герметично уплотнена концевыми деталями на сварке. В качестве материала для изготовления трубок твэл традиционно применяется рекристаллизованный сплав циркония с 1 % ниобия [3].

1.3 Ядерное топливо

В качестве ядерного топлива в реакторах ВВЭР-1000 применяют двуокись урана [4].

UO₂ имеет следующие свойства:

- $T_{пл} = 2800\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- гранецентрированная решетка;
- $\rho = 10,97\text{ г/см}^3$.

Радиационная стойкость двуокиси урана определяется:

- накоплением продуктов деления, имеющих больший объем, чем разделившиеся атомы;
- рост отдельных зерен в результате выбивания атомов из узлов кристаллической решетки и внедрения в решетку продуктов деления [4];
- образование и рост пор.

2 Нейтронно-физические параметры критического стационарного ядерного реактора

2.1 Предварительный тепловой расчет

Для выполнения предварительного расчета использованы рабочие параметры ВВЭР, которые представлены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Выбранные рабочие параметры

Параметр	Символ	Значение
Тепловая мощность, МВт	N	1000
Средняя удельная объемная нагрузка, кВт/л	\bar{N}_0	65
Отношение высоты к диаметру	m	0,87
Коэффициент увеличения объема АЗ за счет СУЗ	η	1,07
Объемный коэффициент неравномерности	K_v	2
Осевой коэффициент неравномерности	K_z	1,30
Размер элементарной ячейки «под ключ», см	$h_{яч}$	1,22
Внешний диаметр ТВЭЛ, см	$D_{ТВЭЛ}$	0,91

Основываясь на требуемую мощность реактора, размеры активной зоны оценены следующим образом:

$$V_{a.з} = \frac{N}{\bar{N}_0} \eta, \text{ см}^3; \quad (2.1.1)$$

$$D_{a.з} = \sqrt[3]{\frac{4V_{a.з}}{\pi m}}, \text{ см}; \quad (2.1.2)$$

$$H_{a.з} = mD_{a.з}, \text{ см}, \quad (2.1.3)$$

где $V_{a.з}, D_{a.з}, H_{a.з}$ – объем, диаметр и высота активной зоны;

m – отношение высоты к диаметру;

N – заданная тепловая мощность реактора, МВт;

η – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора.

Вследствие размещения регулирующих стержней СУЗ максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = \overline{N_0} \cdot K_v, \text{ МВт/м}^3, \quad (2.1.4)$$

где K_v – объемный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

$\overline{N_0}$ – средняя удельная объемная нагрузка, МВт/м³.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{яч}}{116 \cdot \Pi_0}, \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (2.1.5)$$

где Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭла, см;

$S_{яч}$ – площадь сечения элементарной ячейки, см².

Необходимая для отвода тепла скорость определена в максимально напряженном тепловыделяющем элементе из следующего выражения:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{a.з}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{mn}}, \text{ м/с}, \quad (2.1.6)$$

где v – скорость прокачки теплоносителя;

K_z – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов, см²;

S_{mn} – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на тепловыделяющую сборку, см²;

ρ – плотность теплоносителя при рабочих параметрах, г/см³;

Δi – разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе, ккал/кг.

Данная величина определена по следующей формуле:

$$\Delta i = C_p (t_{вых} - t_{вх}), \text{ ккал/кг}, \quad (2.1.7)$$

где C_p – теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, ккал/(кг · °С);

$t_{вых}, t_{вх}$ – температура теплоносителя на входе и выходе, °С.

Объем активной зоны:

$$V_{a.з} = \frac{N}{N_0} \eta = \frac{1000}{65} \cdot 1,07 = 16,46 \text{ м}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{a.з} = \sqrt[3]{\frac{4V_{a.з}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 16,46}{3,14 \cdot 0,87}} = 2,88 \text{ м} = 288 \text{ см.}$$

Высота активной зоны:

$$H_{a.з} = m D_{a.з} = 0,87 \cdot 388 = 250 \text{ см.}$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\max} = \overline{N_0} \cdot K_v = 65 \cdot 2 = 130 \text{ МВт/м}^3.$$

Для определения максимально допустимой тепловой нагрузки вычислен периметр всех тепловыделяющих элементов в канале и площадь элементарной ячейки.

Периметр тепловыделяющих элементов:

$$\Pi_0 = \pi \cdot D_{\text{твэл}} = 3,14 \cdot 0,91 = 2,859 \text{ см.}$$

Для определения площади элементарной ячейки, имеющей форму квадрата, использована следующая формула:

$$S_{\text{яч}} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{h_{\text{яч}}}{2}\right)^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{1,22}{2}\right)^2 = 1,289 \text{ см}^2.$$

Тогда, максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{116 \cdot \Pi_0} = \frac{130 \cdot 1,289}{116 \cdot 2,859} = 0,51 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Для определения скорости прокачки теплоносителя вычислена площадь, приходящаяся на теплоноситель.

Площадь тепловыделяющего элемента:

$$S_{\text{твэл}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{твэл}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,91^2}{4} = 0,65 \text{ см}^2.$$

Площадь теплоносителя:

$$S_{\text{тн}} = S_{\text{яч}} - S_{\text{твэл}} = 0,639 \text{ см}^2.$$

При рабочих параметрах $t = 263^{\circ}\text{C}$ и $P = 12,2$ МПа, плотность и теплоемкость теплоносителя составляют $0,787$ г/см³ и $1,16$ ккал/(кг·°C) соответственно. Тогда разность теплосодержания теплоносителя на выходе:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,16 \cdot (278 - 248) = 34,8 \text{ ккал/кг.}$$

Тогда скорость прокачки теплоносителя:

$$\nu = \frac{q_{\text{max}} \cdot \Pi_0 \cdot H_{a.з}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{ми}}} = \frac{0,51 \cdot 2,859 \cdot 250}{3,6 \cdot 1,3 \cdot 0,787 \cdot 34,8 \cdot 0,639} = 4,41 \text{ м/с.}$$

Таким образом, получившееся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет указанным требованиям ($\nu < 10$ м/с) [5].

Все полученные результаты в ходе проведения предварительного расчета представлены в таблице 2.1.2.

Таблица 2.1.2 – Результаты предварительного расчета

Параметр	Значение
Объем АЗ, м ³	16,46
Диаметр АЗ, см	288
Высота АЗ, см	250
Максимальная удельная объемная нагрузка, Вт/м ³	130
Максимально допустимая тепловая нагрузка, Гкал/м ² ·ч	0,51
Скорость прокачки ТН, м/с	4,41

Принятые в предварительном расчете, шаг решетки, размеры канала, твэла, скорость теплоносителя, площадь сечения теплоносителя уточняются в результате последующего физического расчета.

2.2 Физический расчет реактора

Рассчитаны нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, замедляющие свойства) для каждой зоны (топливо, оболочка, теплоноситель, замедлитель), т.к. каждая из них состоит из материалов с разными свойствами взаимодействия с нейтронами. Температура всех элементов реактора принимается 20 °С.

Для расчета ядерной концентрации для каждого элемента использована формула:

$$N = \frac{N_A \cdot \rho}{A}, \text{ молекул/см}^3, \quad (2.2.1)$$

где N_A – постоянная Авогадро, моль⁻¹;

ρ – весовая концентрация элемента, г/см³;

A – атомный вес элемента, г/моль.

Вычисление ядерных концентраций производилось для каждого элемента активной зоны и отражателя. Результаты расчета представлены в приложении А. Ниже представлен расчет концентрации ядерного топлива:

концентрация UO₂:

$$N_{UO_2} = \frac{N_A \cdot \rho_{UO_2}}{A_{UO_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,97}{270} = 2,44 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3};$$

концентрация U²³⁵:

$$N_{U^{235}} = N_{UO_2} \cdot \omega = 2,44 \cdot 10^{22} \cdot 0,018 = 4,404 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3},$$

где ω – обогащение по U²³⁵;

концентрация U²³⁸:

$$N_{U^{238}} = N_{UO_2} \cdot (1 - \omega) = 2,44 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0,018) = 2,403 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3};$$

концентрация O₂:

$$N_{O_2} = 2 \cdot N_{UO_2} = 4,89 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

Для определения сечений деления и поглощения, отнесенных к средней скорости тепловых нейтронов, использовались формулы:

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,886 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}; \quad (2.2.2)$$

$$\bar{\sigma}_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,886 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}, \quad (2.2.3)$$

где σ_a, σ_f – табличные значения сечений, барн;

f_a, f_f – поправочный коэффициент f , учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/v^2$;

$T_{н.г}$ – температура нейтронного газа.

Температура нейтронного газа принята равной $T_{н.г} = 393$ К. При таком значении температуры, поправочный коэффициент равен $f_f = 0,9613$ и $f_a = 0,9613$ для делящихся нуклидов и $f_a = 1$ для неделящихся нуклидов.

Макроскопические сечения вычислены по формуле:

$$\Sigma_i = N_i \cdot \sigma_i, \text{ см}^{-1}. \quad (2.2.4)$$

Ниже представлен расчет микроскопических и макроскопических сечений для топлива.

Микросечения для U^{235} :

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,886 \cdot 0,9613 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 502,29 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,886 \cdot 0,9613 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 428,01 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{235}} = 15 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{U^{235}} = \sigma_a^{U^{235}} + \sigma_s^{U^{235}} (1 - \mu_s) = 502,29 + 15(1 - 0) = 517,29 \text{ барн}.$$

Микросечения для U^{238} :

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,886 \cdot 0,9613 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 1,99 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{238}} = 9 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{U^{238}} = \sigma_a^{U^{238}} + \sigma_s^{U^{238}} (1 - \mu_s) = 1,99 + 9(1 - 0) = 10,99 \text{ барн.}$$

Микросечения для O₂:

$$\sigma_s^{O_2} = 3,75 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{O_2} = \sigma_a^{O_2} + \sigma_s^{O_2} (1 - \mu_s) = 0 + 3,75(1 - 0,04) = 3,6 \text{ барн.}$$

Микросечения для UO₂:

$$\sigma_a^{UO_2} = \sigma_a^{U^{235}} + \sigma_a^{U^{238}} = 502,29 + 1,99 = 504,28 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{UO_2} = \sigma_f^{U^{235}} = 428,01 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{UO_2} = \sigma_s^{U^{235}} + \sigma_s^{U^{238}} + \sigma_s^{O_2} = 15 + 9 + 3,75 = 27,75 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{UO_2} = \sigma_{tr}^{U^{235}} + \sigma_{tr}^{U^{238}} + \sigma_{tr}^{O_2} = 517,29 + 10,99 + 3,6 = 531,88 \text{ барн.}$$

Макросечения для U²³⁵:

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 428,01 \cdot 10^{-24} \cdot 4,404 \cdot 10^{20} = 0,189 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 502,29 \cdot 10^{-24} \cdot 4,404 \cdot 10^{20} = 0,221 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 4,404 \cdot 10^{20} = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 517,29 \cdot 10^{-24} \cdot 4,404 \cdot 10^{20} = 0,228 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для U²³⁸:

$$\Sigma_a^{U^{238}} = 1,99 \cdot 10^{-24} \cdot 2,403 \cdot 10^{22} = 0,0479 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{238}} = 9 \cdot 10^{-24} \cdot 2,403 \cdot 10^{22} = 0,216 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{238}} = 10,99 \cdot 10^{-24} \cdot 2,403 \cdot 10^{22} = 0,264 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для O₂:

$$\Sigma_s^{O_2} = 3,75 \cdot 10^{-24} \cdot 4,89 \cdot 10^{22} = 0,184 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{O_2} = 3,6 \cdot 10^{-24} \cdot 4,89 \cdot 10^{22} = 0,176 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для UO₂:

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^{235}} + \Sigma_a^{U^{238}} + \Sigma_a^{O_2} = 0,221 + 0,0479 + 0 = 0,2689 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{UO_2} = \Sigma_f^{U^{235}} = 0,189 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{UO_2} = \Sigma_s^{U^{235}} + \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^{O_2} = 0,7 + 0,216 + 0,184 = 0,407 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{UO_2} = \Sigma_{tr}^{U^{235}} + \Sigma_{tr}^{U^{238}} + \Sigma_{tr}^{O_2} = 0,228 + 0,264 + 0,176 = 0,668 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность рассчитаны по формулам, представленным ниже:

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}}; \quad (2.2.5)$$

$$\xi \Sigma_s = \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \cdot \Sigma_s, \text{ см}^{-1}. \quad (2.2.6)$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для U^{235} :

$$\xi^{U^{235}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 8,49 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 \cdot 10^{-2} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для U^{238} :

$$\xi^{U^{238}} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 8,38 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{238}} = 8,38 \cdot 10^{-3} \cdot 0,216 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для O_2 :

$$\xi^{O_2} = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0,12;$$

$$\xi \Sigma_s^{O_2} = 0,12 \cdot 0,184 = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для UO_2 :

$$\xi^{UO_2} = \frac{\sum \xi \Sigma}{\sum \Sigma} = \frac{\xi \Sigma^{U^{235}} + \xi \Sigma^{U^{238}} + \xi \Sigma^{O_2}}{\Sigma^{U^{235}} + \Sigma^{U^{238}} + \Sigma^{O_2}} = \frac{5,6 \cdot 10^{-5} + 1,8 \cdot 10^{-3} + 2,2 \cdot 10^{-2}}{0,7 \cdot 10^{-2} + 0,216 + 0,184} = 5,87 \cdot 10^{-2};$$

$$\xi \Sigma_s^{UO_2} = 5,87 \cdot 10^{-2} \cdot 0,407 = 2,39 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

2.3 Гомогенизация

Гетерогенная элементарная ячейка данного реактора изображена на рисунке 2.3.1 [6], где горизонтальной штриховкой обозначен замедлитель-теплоноситель (H_2O), заштрихованная окружность большего диаметра – оболочка твэла, центральным отверстием – гелий, заштрихованная окружность меньшего диаметра – топливо. На данном рисунке представлена упрощенная схема элементарной ячейки.

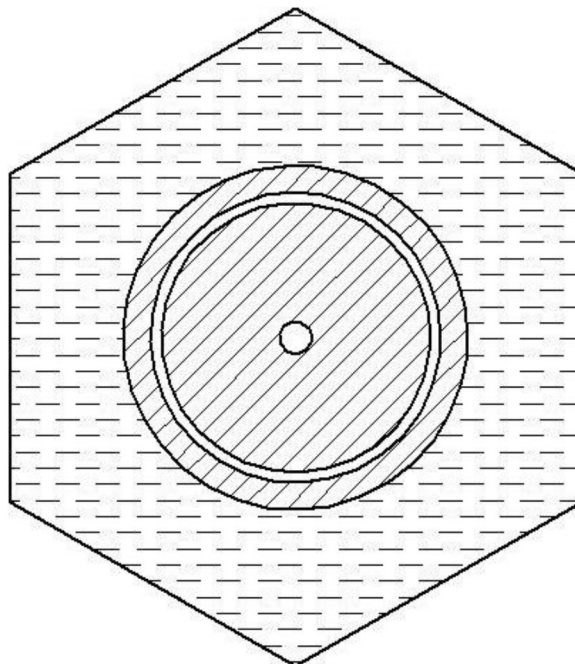


Рисунок 2.3.1 – Гетерогенная элементарная ячейка

Для упрощения расчета необходимо проведена гомогенизация данной ячейки двумя способами. Для проведения гомогенизации были приняты геометрические величины, представленные в таблице 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Геометрические величины для расчета гомогенизации

Параметр	Символ	Значение
Внешний радиус твэла, см	$R_{\text{ТВЭЛ}}$	0,455
Внутренний радиус твэла, см	$r_{\text{ТВЭЛ}}$	0,07
Внутренний радиус оболочки, см	$r_{\text{об}}$	0,39
Внешний радиус топлива, см	$R_{\text{топ}}$	0,3765
Площадь сечения твэла, см ²	$S_{\text{ТВЭЛ}}$	0,65
Площадь сечения замедлителя-теплоносителя, см ²	$S_{\text{тн}}$	0,639
Площадь сечения ячейки, см ²	$S_{\text{яч}}$	1,289

2.3.1 Гомогенизация первого вида

В данном случае элементарная ячейка представлена в виде однородной гомогенизированной смеси. Эскиз данной ячейки изображен на рисунке 2.3.1.1 [6].

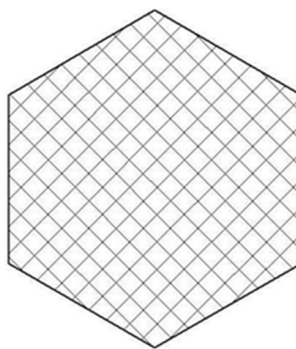


Рисунок 2.3.1.1 – Элементарная ячейка после гомогенизации первого вида

Ядерные концентрации гомогенизированных элементов найдены по следующей формуле:

$$N_i^{z1} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{\text{яч}}}, \text{ [ядер/см}^3\text{]}, \quad (2.3.1.1)$$

где N_i – гетерогенная ядерная концентрация i -го элемента, ядер/см³;
 S_i – площадь сечения i -го элемента в элементарной ячейки, см².

Рассчитаны площади сечения недостающих элементов:

$$S_{мон} = \pi(R_{мон}^2 - r_{твэл}^2) = 3,14 \cdot (0,3765^2 - 0,07^2) = 0,43 \text{ см}^2;$$

$$S_{об} = \pi(R_{твэл}^2 - r_{об}^2) = 3,14 \cdot (0,455^2 - 0,39^2) = 0,173 \text{ см}^2;$$

$$S_{He} = \pi(r_{об}^2 - R_{мон}^2) + \pi \cdot r_{твэл}^2 = 3,14 \cdot (0,39^2 - 0,3765^2) + 3,14 \cdot 0,07^2 = 0,048 \text{ см}^2;$$

$$S_{зам} = S_{яч} - S_{мон} - S_{об} - S_{He} = 1,289 - 0,43 - 0,173 - 0,048 = 0,639 \text{ см}^2.$$

Соответственно, ядерные концентрации после гомогенизации будут равны:

$$N_{U^{235}}^{z1} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{мон}}{S_{яч}} = \frac{4,404 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{1,289} = 1,469 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{U^{238}}^{z1} = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{мон}}{S_{яч}} = \frac{2,403 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,289} = 0,801 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{O(мон)}^{z1} = \frac{N_{O(мон)} \cdot S_{мон}}{S_{яч}} = \frac{4,894 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,289} = 1,632 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_H^{z1} = \frac{N_H \cdot S_{тн}}{S_{яч}} = \frac{5,267 \cdot 10^{22} \cdot 0,639}{1,289} = 2,61 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Zr}^{z1} = \frac{N_{Zr} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = \frac{4,309 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{1,289} = 0,576 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{O(тн)}^{z1} = \frac{N_{O(тн)} \cdot S_{тн}}{S_{яч}} = \frac{2,633 \cdot 10^{22} \cdot 0,639}{1,289} = 1,305 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

2.3.2 Гомогенизация второго вида

В данном случае гетерогенная элементарная ячейка разделена на две гомогенизированных зоны: замедлитель и фиктивный блок. Эскиз данной конфигурации ячейки представлен на рисунке 3.2.2.1 [7].

Ядерные концентрации нуклидов замедлителя остаются неизменными, по сравнению, с гетерогенной ячейкой:

$$N_i^{z2} = N_i. \quad (2.3.2.1)$$

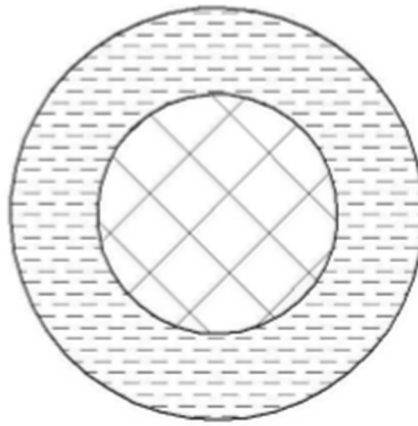


Рисунок 2.3.2.1 – Эскиз элементарной ячейки после гомогенизации второго вида

Ядерные концентрации нуклидов фиктивного блока рассчитаны по следующей формуле:

$$N_i^{z2} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{\text{твэл}}} = [\text{ядер/см}^3]; \quad (2.3.2.2)$$

$$N_{U^{235}}^{z2} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{\text{мон}}}{S_{\text{твэл}}} = \frac{4,404 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{0,65} = 2,913 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{U^{238}}^{z2} = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{\text{мон}}}{S_{\text{твэл}}} = \frac{2,40 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 1,475 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{O^{(мон)}}^{z2} = \frac{N_{O^{(мон)}} \cdot S_{\text{мон}}}{S_{\text{твэл}}} = \frac{4,894 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 3,237 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Zr}^{z2} = \frac{N_{Zr} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{твэл}}} = \frac{4,3 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{0,65} = 1,144 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

2.4 Расчет коэффициента размножения в бесконечной среде

Коэффициент размножения для бесконечной среды рассчитан по формуле четырех сомножителей:

$$k_{\infty} = \varphi \cdot \mu \cdot \theta \cdot \eta, \quad (2.4.1)$$

где φ – вероятность избежать резонансного захвата;
 μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;
 θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;
 η – число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе.

2.4.1 Вероятность избежать резонансного захвата

Резонансный захват нейтронов происходит ядрами U^{238} . Вероятность избежать нейтронами резонансного захвата рассчитан по формуле:

$$\varphi = \exp \left(- \frac{k_T \cdot R_{UO_2} \cdot \sqrt{R_{\text{мвэл}} \cdot \varepsilon} + 0,73 \cdot R_{UO_2}^2 \cdot \varepsilon}{\xi \Sigma_S^{H_2O} \cdot S_{\text{зам}} + \xi \Sigma_S^{\phi.6.} \cdot S_{\phi}} \right), \quad (2.4.1.1)$$

где k_T – температурный коэффициент;
 ε – пористость по U^{238} .

Температурный коэффициент рассчитан по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot \sqrt{T_U}), \quad (2.4.1.2)$$

где T_U – температура топлива.

Пористость по U^{238} определена следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{N^{U^{238}}}{N_0^{U^{238}}}, \quad (2.4.1.3)$$

где $N_0^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в природном уране;
 $N^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в топливе.

Температурный коэффициент:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot \sqrt{293}) = 1,0072.$$

Пористость по U^{238} :

$$\varepsilon = \frac{2,40 \cdot 10^{22} \cdot 238}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,993 \cdot 18,7} = 0,508.$$

Тогда вероятность избежать резонансного захвата:

$$\varphi = \exp \left(- \frac{1,0072 \cdot 0,3765 \cdot \sqrt{0,455 \cdot 1 \cdot 0,508} + 0,73 \cdot 1 \cdot 0,3765^2 \cdot 0,508}{1,062 \cdot 0,639 + 0,0158 \cdot 0,65} \right) = 0,711.$$

2.4.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

Величина μ в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топливного блока [8]. При расчете μ для стержневых ТВЭлов использована формула:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P}, \quad (2.4.2.1)$$

где P – вероятность того, что быстрый нейтрон испытывает какое-либо столкновение с ядром U^{238} .

Значение P определяется по рисунку 2.4.2.1:

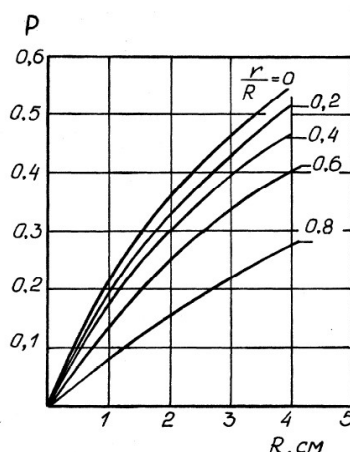


Рисунок 2.4.2.1 – График вероятности столкновения быстрого нейтрона с ядром U^{238}

При соотношении $\frac{r}{R} = 0,2$ и радиусе топлива 0,3765 см, величина $P=0,1$.

Тогда:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} = 1,0097.$$

2.4.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов

Расчет θ прошел в два этапа. Сначала определена величина θ'_ϕ – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов [9]. Затем определена θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{a_{mon}}}{\Sigma_{a_\phi}}. \quad (2.4.3.1)$$

Величина отношения числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке:

$$\frac{1}{\theta'_\phi} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_{a_{зам}}}{S_\phi \cdot \Sigma_{a_\phi}} + (E - 1), \quad (2.4.3.2)$$

где F – коэффициент экранирования;

$(E - 1)$ – фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе.

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования равен:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_\phi}{L_\phi} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}{I_1\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}, \quad (2.4.3.3)$$

где I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков;

L_ϕ – длина диффузии в фиктивном блоке.

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{зам}}{R_\phi} - 0,75 \right). \quad (2.4.3.4)$$

Длина диффузии определена по формуле:

$$L = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr} \cdot \Sigma_a}}. \quad (2.4.3.5)$$

Тогда длина диффузии в фиктивном блоке и блоке замедлителя:

$$L_{\phi.б.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{\phi.б.} \cdot \Sigma_a^{\phi.б.}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,535 \cdot 0,179}} = 1,864 \text{ см};$$

$$L_{зам} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{H_2O} \cdot \Sigma_a^{H_2O}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 1,817 \cdot 0,0173}} = 3,247 \text{ см}.$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{зам}}{R_\phi} - 0,75 \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{0,641}{3,247} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{0,641}{0,455} - 0,75 \right) = -0,008.$$

Коэффициент экранирования:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_\phi}{L_\phi} \cdot \frac{I_0 \left(\frac{R_\phi}{L_\phi} \right)}{I_1 \left(\frac{R_\phi}{L_\phi} \right)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,455}{1,864} \cdot \frac{I_0 \left(\frac{0,455}{1,864} \right)}{I_1 \left(\frac{0,455}{1,864} \right)} = 1,007.$$

Тогда величина отношения числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке:

$$\frac{1}{\theta'_{\phi.б.}} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_a^{H_2O}}{S_{\phi.б.} \cdot \Sigma_a^{\phi.б.}} + (E-1) = 1 + 1,007 \cdot \frac{0,639 \cdot 0,0173}{0,650 \cdot 0,179} - 0,008 = 1,087;$$

$$\theta'_\phi = 0,919.$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^{\text{топ}}}{\Sigma_a^{\text{ф.б.}}} = \frac{0,177}{0,179} = 0,991.$$

Тогда коэффициент использования тепловых нейтронов:

$$\theta = \theta_0 \cdot \theta'_\phi = 0,991 \cdot 0,919 = 0,911.$$

2.4.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе

Коэффициент η показывает число вторичных нейтронов, приходящихся на один тепловой нейтрон, поглощенный топливом и вызвавший деление, рассчитан по формуле:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_{f_{\text{топ}}}}{\Sigma_{a_{\text{топ}}}}, \quad (2.4.4.1)$$

где ν_f — число нейтронов, которое испускается при акте деления.

Тогда:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_{f_{\text{топ}}}}{\Sigma_{a_{\text{топ}}}} = 2,42 \cdot \frac{0,189}{0,269} = 1,695.$$

Тогда коэффициент размножения в бесконечной среде:

$$k_\infty = \mu \cdot \phi \cdot \theta \cdot \eta = 1,0097 \cdot 0,711 \cdot 0,911 \cdot 1,695 = 1,109.$$

2.5 Расчет эффективного коэффициента размножения

Для нахождения эффективного коэффициента размножения нейтронов использована формула [10]:

$$k_{\text{эфф}} = k_\infty \cdot P = k_\infty \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2}, \quad (2.5.1)$$

где B^2 — геометрический параметр;

τ_p — возраст нейтронов;

P — вероятность избежать утечки.

Квадрат длины диффузии отражателя с учетом гетерогенности:

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{ф.б.}^2 \cdot \theta; \quad (2.5.2)$$

$$L_p^2 = 3,247^2 \cdot (1 - 0,911) + 1,864^2 \cdot 0,911 = 4,103 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов с учётом всех элементов ячейки:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^2; \quad (2.5.3)$$

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^2 = 27,3 \cdot \left(\frac{1,289}{0,639} \right)^2 = 38,775 \text{ см}^2.$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta} \right)^2, \quad (2.5.4)$$

где δ –эффективная добавка за счет отражателя.

Эффективная добавка за счет отражателя для водо-водяных реакторов с водным отражателем:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40), \quad (2.5.5)$$

где M –длина миграции нейтронов в отражателе.

Длина миграции:

$$M = \sqrt{L_{H_2O}^2 + \tau_{H_2O}}; \quad (2.5.6)$$

$$M = \sqrt{10,54 + 27,3} = 6,15 \text{ см.}$$

Тогда эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (6,15^2 - 40) = 6,98 \text{ см.}$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta} \right)^2 = \left(\frac{\pi}{250 + 2 \cdot 6,98} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{144 + 6,98} \right)^2 = 3,95 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда эффективный коэффициент размножения:

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2} = 1,109 \cdot \frac{\exp(-3,95 \cdot 10^{-4} \cdot 38,775)}{1 + 3,95 \cdot 10^{-4} \cdot 10,54} = 1,083.$$

2.6 Оптимизация параметров ячейки

После расчета k_{∞} подобраны такие параметры ячейки, при которых данный коэффициент будем максимальным. В некоторых диапазонах варьировались шаг расстановки ТВЭЛОВ и радиус топливного блока. Полученные зависимости изображены на рисунках 2.6.1 и 2.6.2 соответственно [11].

Таблица 2.6.1 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения от шага решетки

Шаг решетки $h_{\text{яч}}$, см	k_{∞}
1,22	1,109
1,30	1,160
1,40	1,196
1,50	1,205
1,60	1,198
1,70	1,181
1,80	1,158
1,90	1,130
2,00	1,099

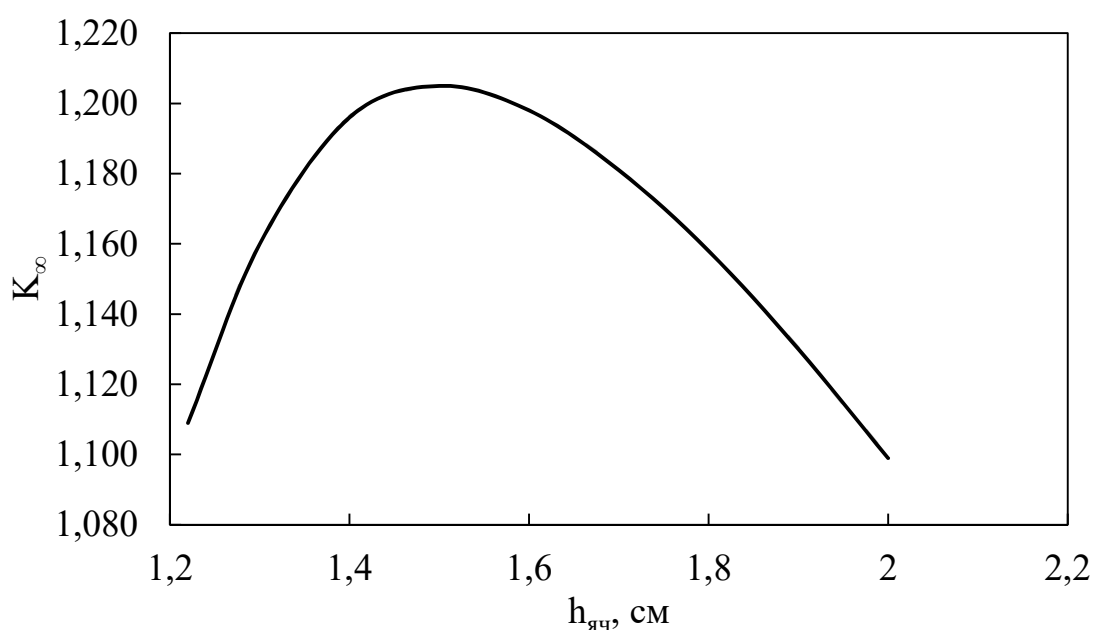


Рисунок 2.6.1 – Зависимость k_{∞} от шага расстановки ТВЭЛОВ

Максимальное $k_{\infty}=1,205$ при $h_{яч}=1,5$ см. Далее при данном $h_{яч}=1,5$ см варьировался радиус топливного блока. Максимальное $k_{\infty}=1,3145$ при $R_{ТВЭЛ}=0,17$ см.

После анализа полученных зависимостей было выбрано оптимальное значение $k_{\infty}=1,315$ при $R_{ТВЭЛ}=0,17$ см, $h_{яч}=1,5$ см, $v=4,41$ м/с.

Но для реакторов типа ВВЭР не рекомендуется брать шаг решетки больше, чем 1,275 см, так как это приведет к уменьшению массы загружаемого топлива, а это отрицательно сказывается на работе ядерного реактора, в частности уменьшается длина компании топлива [12]. В таблице 2.6.2 представлена зависимость k_{∞} от изменения радиуса твэла.

Таблица 2.6.2 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения от радиуса твэла

Радиус твэла $R_{ТВ}$, см	k_{∞}
0,455	1,205
0,450	1,208
0,390	1,245
0,350	1,264
0,300	1,287
0,200	1,313
0,190	1,314
0,185	1,314
0,180	1,314
0,170	1,315
0,150	1,313
0,130	1,308
0,100	1,284

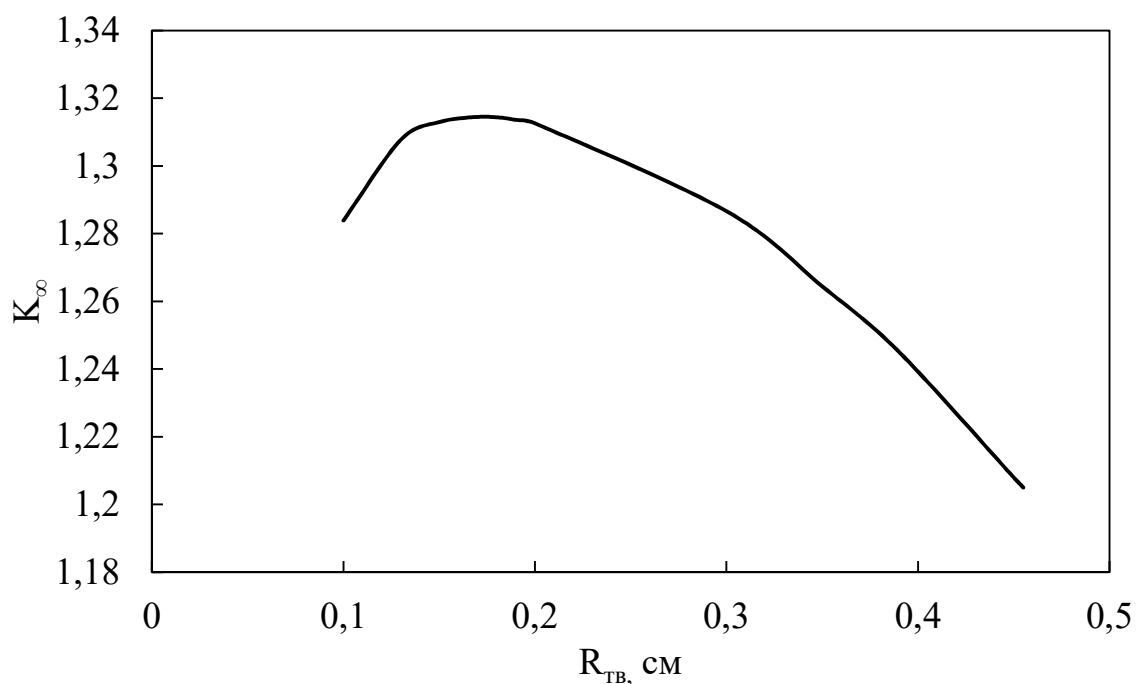


Рисунок 2.6.2 – Зависимость k_∞ от радиуса топливного блока

На рисунке 2.6.2 наблюдается проявление внутренних и внешних блок-эффектов, которые сильно влияют на коэффициент использования тепловых нейтронов. Уменьшение k_∞ на рисунке 2.6.2 объясняется усилением внутреннего блок-эффекта, потому что увеличивается значение плотности потока тепловых нейтронов на поверхности топливного блока.

2.7 Температурные эффекты реактивности

Для определения ТЭР (температурный эффект реактивности), найдена температура нейтронного газа при рабочей температуре реактора и в соответствии с этой температурой пересчитаны значения сечений и другие параметры. При определении температуры нейтронного газа принималась температура замедлителя равной средней температуре теплоносителя. Тогда эффективная температура нейтронного газа вычислена следующим образом:

$$T_{эф}^{н.г} = T_{зам} \left(1 + 1,4 \frac{\Sigma_{аяч}}{\xi \Sigma_{сяч}} \right),$$

где $T_{зам} = \frac{T_{тепвых} + T_{тепвх}}{2} = 536 \text{ К.}$

Сечения $\Sigma_{аяч}$ и $\xi \Sigma_{сяч}$ взяты при температуре замедлителя. Вычислено их отношение:

$$\xi \Sigma_{s,яч} = \frac{\xi \Sigma_{s,мон} \cdot S_{мон} + \xi \Sigma_{s,мен} \cdot S_{мен} + \xi \Sigma_{s,об} \cdot S_{об}}{S_{фб}} = 0,934 \text{ см}^{-1};$$
$$\Sigma_{a,яч} = \frac{\Sigma_{a,мон} \cdot S_{мон} + \Sigma_{a,мен} \cdot S_{мен} + \Sigma_{a,об} \cdot S_{об}}{S_{фб}} = 0,327 \text{ см}^{-1}.$$

Тогда, отношение равно:

$$\frac{\Sigma_{аяч}}{\xi \Sigma_{сяч}} = \frac{0,327}{0,934} = 0,35 \text{ см}^{-1}.$$

При этом, температура нейтронного газа:

$$T_{эф}^{н.г} = 536 \cdot (1 + 1,4 \cdot 0,35) = 799 \text{ К.}$$

Зная температуру нейтронного газа, определено по таблице $f(T_{н.г.})$:

$$f(T_{н.г.}) = 0,932.$$

Необходимо знать верхнюю границу тепловой группы. Для тепловых и не очень жестких промежуточных нейтронов границей тепловой группы условно считается точка пересечения спектров Ферми и Максвелла. Эта точка определена через трансцендентное уравнение [13]:

$$\frac{\chi_{zp}^2 \cdot \exp(-\chi_{zp})}{1 - (1 + \chi_{zp}) \cdot \exp(-\chi_{zp})} = \frac{\Sigma_{аяч}}{\xi \Sigma_{сяч}}, \quad (2.7.1)$$

где $\chi_{zp} = \frac{E_{zp}}{E_T}.$

Из уравнения 2.7.1 было определено значение $\chi_{гр}=3,52$. Используя график функции $F(\chi_{zp})$, представленный на рисунке 2.7.1, было определено значение F, которое составило 1,1.

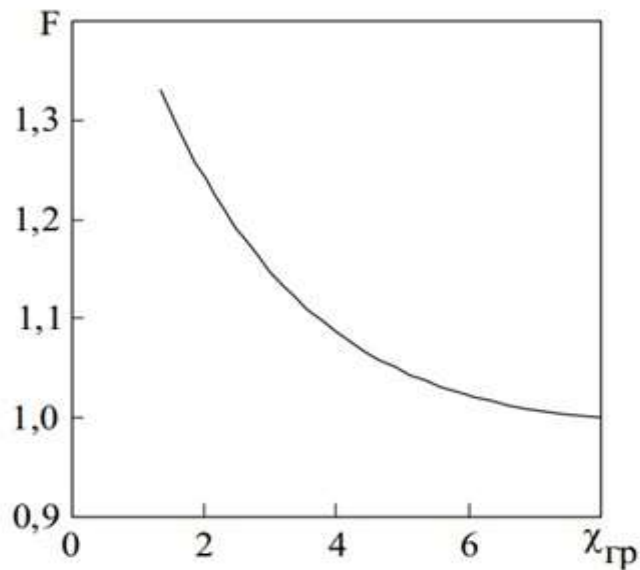


Рисунок 2.7.1 – График функции $F(\chi_{гр})$

С учетом определённых значений вычислено изменение сечений:

$$\bar{\sigma}_{f,a} = \sigma_{f_0,a_0} \cdot 0,886 \cdot f(\chi_{zp}) \cdot F(\chi_{zp}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}},$$

где $f(T_{н.г.}) = 0,932,$

$$F(\chi_{zp}) = 1,1.$$

2.7.1 Коэффициент размножения «горячего» реактора

Учтены изменения коэффициентов формулы четырех сомножителей. В таблице 2.7.1.1 значения коэффициентов формулы четырех сомножителей, пересчитанные в программе MS Excel.

Таблица 2.7.1.1 – Значения коэффициентов формулы четырёх сомножителей для «холодного» и «горячего» состояния.

Коэффициент	Значение в «холодном» реакторе	Значение в «горячем» реакторе	Изменение значения
φ	0,711	0,729	0,018
μ	1,001	1,001	0
θ	0,911	0,881	-0,030
η	1,695	1,695	0
k_{∞}	1,109	1,089	-0,019

Эффективный коэффициент размножения «горячего» реактора определен по формуле:

$$k_{\text{эфф}}^{\text{гор}} = k_{\infty}^{\text{гор}} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_{\text{гор}})}{1 + B^2 L_{\text{гор}}^2}.$$

Возраст нейтронов для «горячего» реактора вычислен следующим образом:

$$\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{хол}} - \frac{1}{3 \cdot \xi \Sigma_{\text{ср}} \cdot \Sigma_{\text{тр}} \cdot \Sigma_{\text{м}} \cdot \Sigma_{\text{а}}} \cdot \ln \frac{T_{\text{н.г}}}{293}.$$

Квадрат длины диффузии для решетки гетерогенного реактора, находящегося в рабочем состоянии, рассчитан так же, как и для холодного реактора. Зависимость квадрата длины диффузии замедлителя от температуры вычислена по следующей формуле:

$$L_{зам}^2 = L_{зам}^2(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0,48}.$$

Пересчитывая значения τ и L^2 для «горячего» состояния, получен эффективный коэффициент размножения для «горячего» реактора:

$$k_{эфф}^{гор} = 1,071.$$

Определен температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \frac{k_{эфф}^{гор} - 1}{k_{эфф}^{гор}} - \frac{k_{эфф}^{хол} - 1}{k_{эфф}^{хол}} = -0,011.$$

Температурный коэффициент реактивности:

$$\alpha = \frac{\rho_{гор} - \rho_{хол}}{\Delta T} = \frac{-0,011}{536 - 293} = -4,52 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

2.8 Отравление ядерного реактора

Чтобы определить концентрацию отравителей и их влияние на работу ЯР, были введены следующие значения, которые представлены в таблице 2.8.1

Таблица 2.8.1 – Начальные параметры

Параметр	Значение
N, МВт	1000
V АЗ, м ³	16,46
θ	0,911
Q _f , Дж	$3,2 \cdot 10^{-11}$
$\Sigma_f^{u^{235}}$, см ⁻¹	0,189
$\Sigma_a^{u^{235}}$, см ⁻¹	0,221
Σ_a^{mon} , см ⁻¹	0,164
ω_I , %	5,6
ω_{Xe} , %	0,3
ω_{Pm} , %	1,3

Продолжение таблицы 2.8.1

$\lambda_I, \text{с}^{-1}$	$2,870 \cdot 10^{-5}$
$\lambda_{Xe}, \text{с}^{-1}$	$2,093 \cdot 10^{-5}$
$\lambda_{Pm}, \text{с}^{-1}$	$4,097 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_a^{Xe}, \text{барн}$	$2,750 \cdot 10^6$
$\sigma_a^{Sm}, \text{барн}$	$5,920 \cdot 10^4$

2.8.1 Стационарное отравление ядерного реактора Xe^{135}

Xe^{135} в ядерном реакторе образуется двумя способами:

- как продукт распада радиоактивного I^{135} , который имеет высокий выход в реакции деления U^{235} ;
- непосредственно в реакции деления U^{235} с массовым выходом около 0,3 % [15].

Для оценки стационарного отравления реактора Xe^{135} рассчитаны стационарные концентрации I^{135} и Xe^{135} .

Стационарные концентрации йода и ксенона вычислены по следующим формулам:

$$N_I^{cm} = \frac{\omega_I \cdot \Sigma_f^{U^{235}} \cdot \Phi}{\lambda_I};$$

$$N_{Xe}^{cm} = \frac{(\omega_{Xe} + \omega_I) \cdot \Sigma_f^{U^{235}} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi},$$

где ω_I – выход I^{135} в реакции деления U^{235} тепловыми нейтронами;

$\Sigma_f^{U^{235}}$ – макроскопическое сечение деления U^{235} , см^{-1} ;

Φ – плотность потока тепловых нейтронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

λ_I – постоянная распада I^{135} , с^{-1} ;

ω_{Xe} – выход Xe^{135} в реакции деления U^{235} тепловыми нейтронами;

λ_{Xe} – постоянная распада Xe^{135} , с^{-1} ;

σ_a^{Xe} – микроскопическое сечение поглощения Xe^{135} , барн.

Плотность потока тепловых нейтронов в ЯР вычислена по следующей формуле:

$$\Phi = \frac{N}{\sum_f^{U^{235}} \cdot V \cdot Q_f},$$

где N – мощность реактора, Вт;

V – объём активной зоны реактора, $см^3$;

Q_f – энергия деления ядра U^{235} , Дж.

Используя данную формулу рассчитана плотность потока тепловых нейтронов:

$$\Phi = \frac{1 \cdot 10^9}{0,189 \cdot 0,1646 \cdot 10^8 \cdot 3,2 \cdot 10^{-11}} = 1,01 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Определим стационарные концентрации Xe^{135} и I^{135} :

$$N_{cm}^I = \frac{0,056 \cdot 0,189 \cdot 1,01 \cdot 10^{13}}{2,87 \cdot 10^{-5}} = 3,72 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{cm}^{Xe} = \frac{(0,003 + 0,056) \cdot 0,189 \cdot 1,01 \cdot 10^{13}}{2,093 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^6 \cdot 10^{-24} \cdot 1,01 \cdot 10^{13}} = 2,31 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Накопление ядер I^{135} и Xe^{135} после пуска реактора происходит по следующим законам:

$$N_I = N_I^{cm} \cdot (1 - e^{-\lambda_I \cdot t});$$

$$N_{Xe} = N_{Xe}^{cm} \cdot (1 - e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi) \cdot t}) - \frac{N_I^{cm}}{\frac{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_I} - 1} \cdot (e^{-\lambda_I \cdot t} - e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi) \cdot t}).$$

На рисунке 2.8.1.1 представлена зависимость ядерной концентрации ядер I^{135} и Xe^{135} от времени после пуска реактора.

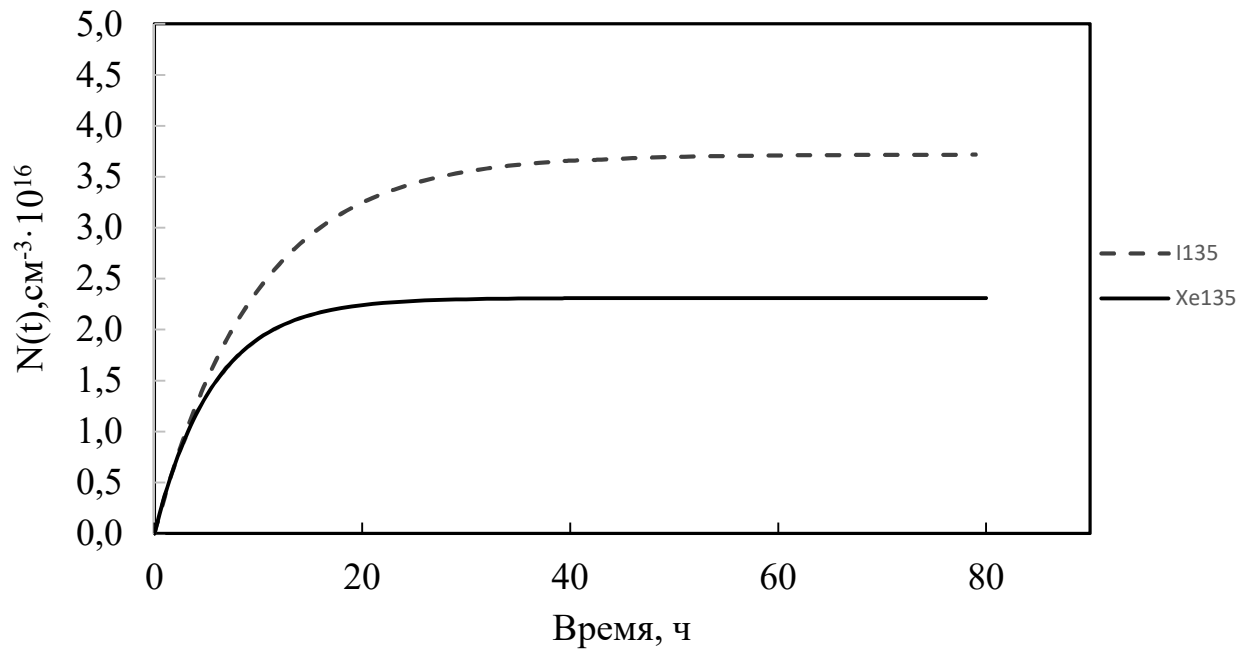


Рисунок 2.8.1.1 – Зависимость ядерных концентраций I^{135} и Xe^{135} от времени

Из графика видно, что для выхода концентраций в стационар требуется около 20-23 часа.

Рассчитан вклад в потерю реактивности, который вносит отравление Xe^{135} :

$$\rho_{Xe}^{cm} = -\Theta \frac{(\omega_{Xe} + \omega_I) \cdot \Sigma_f^{U^{235}} \cdot \Phi \cdot \sigma_a^{Xe}}{(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi) \cdot \Sigma_a^{mon}};$$

$$\rho_{Xe}^{cm} = -0,911 \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 0,189 \cdot 1,01 \cdot 10^{13} \cdot 2,750 \cdot 10^{-18}}{(2,093 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^6 \cdot 10^{-24} \cdot 1,01 \cdot 10^{13}) \cdot 0,164} = -0,035.$$

Выражена зависимость потерь реактивности при отравлении реактора Xe^{135} как функцию времени:

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{Xe}^{cm} (0,4 \cdot e^{-0,0001t} + (1 - 0,4) \cdot e^{-0,0000029t}).$$

На рисунке 2.8.1.2 представлена зависимость потери реактивности при отравлении ядерного реактора Xe^{135} от времени.

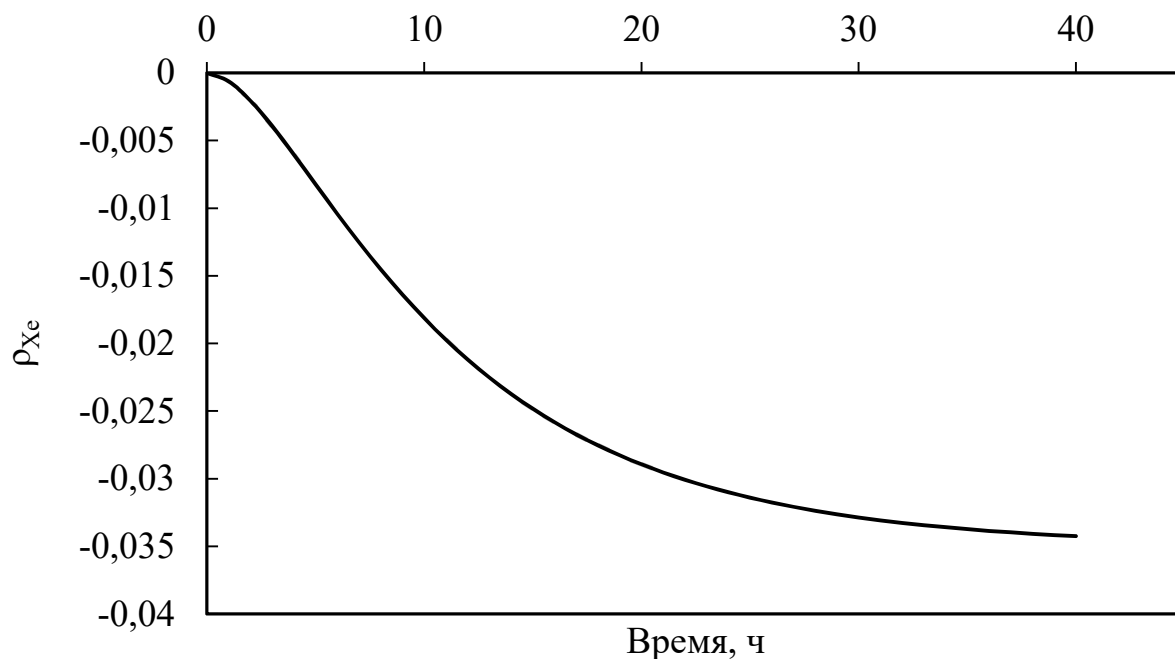


Рисунок 2.8.1.2 – Зависимость потери реактивности при отравлении ядерного реактора Xe^{135} от времени

Из графика видно, что потери реактивности при отравлении реактора Xe^{135} растут до определённого значения времени, после которого устанавливается постоянное значение. Это связано с тем, что ядерная концентрация Xe^{135} достигла своего стационарного значения.

2.8.2 Стационарное отравление ядерного реактора Sm^{149}

В отличие от Xe^{135} , являющегося радиоактивным и образующегося напрямую в реакции деления, Sm^{149} стабилен и образуется лишь как продукт радиоактивного распада Pm^{149} .

Стационарные концентрации прометия и самария вычислены по следующим формулам:

$$N_{Pm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \sum_f^{U^{235}} \cdot \Phi}{\lambda_{Pm}};$$

$$N_{Sm}^{cm} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f^{U^{235}}}{\sigma_{Sm}},$$

где ω_{Pm} – выход Pm^{149} в реакции деления U^{235} тепловыми нейтронами;

λ_{Pm} – постоянная распада прометия, c^{-1} ;

σ_a – микроскопическое сечение поглощения Sm^{149} .

$$N_{Pm}^{cm} = \frac{0,013 \cdot 0,189 \cdot 1,01 \cdot 10^{13}}{4,097 \cdot 10^{-6}} = 6,05 \cdot 10^{15};$$

$$N_{Sm}^{cm} = \frac{0,013 \cdot 0,189}{5,92 \cdot 10^4 \cdot 10^{-24}} = 4,15 \cdot 10^{16}.$$

Накопление ядер Pm^{149} и Sm^{149} после пуска ядерного реактора в зависимости от времени происходит по следующим законам:

$$N_{Pm} = N_{Pm}^{cm} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t});$$

$$N_{Sm} = N_{Sm}^{cm} \cdot (1 - e^{-\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot t}) - \frac{N_{Pm}^{cm}}{\frac{\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi}{\lambda_{Pm}} - 1} \cdot (e^{-\lambda_{Pm} \cdot t} - e^{-\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot t}).$$

На рисунке 2.8.2.1 представлена зависимость ядерной концентрации ядер Pm^{149} и Sm^{149} в зависимости от времени после пуска реактора.

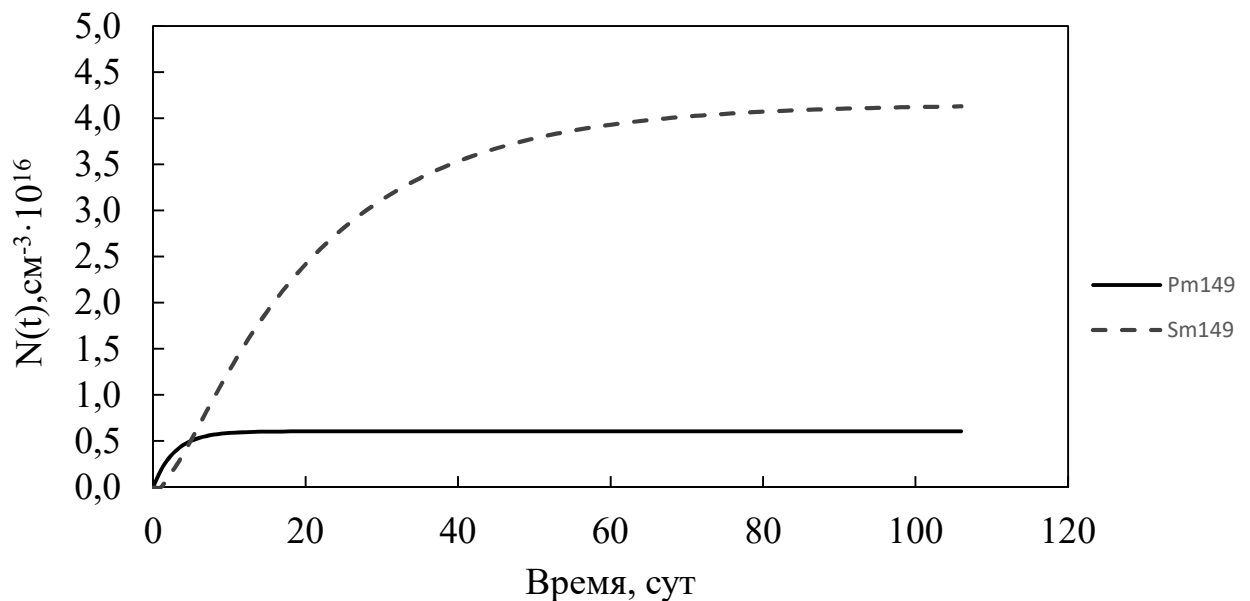


Рисунок 2.8.2.1 – Зависимости ядерных концентраций Pm^{149} и Sm^{149} от времени

Из графика видно, что концентрация Pm^{149} достигает стационарного значения примерно через 7-8 суток, а Sm^{149} примерно через 45-46 суток.

Определено значение потери реактивности при отравлении ядерного реактора Sm^{149} :

$$\rho_{Xe}^{cm} = -\Theta \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f^{U^{235}}}{\Sigma_a^{mon}};$$

$$\rho_{Xe}^{cm} = -0,911 \frac{0,013 \cdot 0,189}{0,164} = -0,008.$$

Выражена зависимость потери реактивности при отравлении Sm^{149} от времени:

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_{Sm}^{cm} \left(1 - \frac{\lambda_{Pm} \cdot e^{-\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot t}}{\lambda_{Pm} - \sigma_a^{Sm} \cdot \Phi} + \frac{\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot e^{-\lambda_{Pm} \cdot t}}{\lambda_{Pm} - \sigma_a^{Sm} \cdot \Phi} \right).$$

На рисунке 2.8.2.2 представлена зависимость потери реактивности при отравлении Sm^{149} от времени.

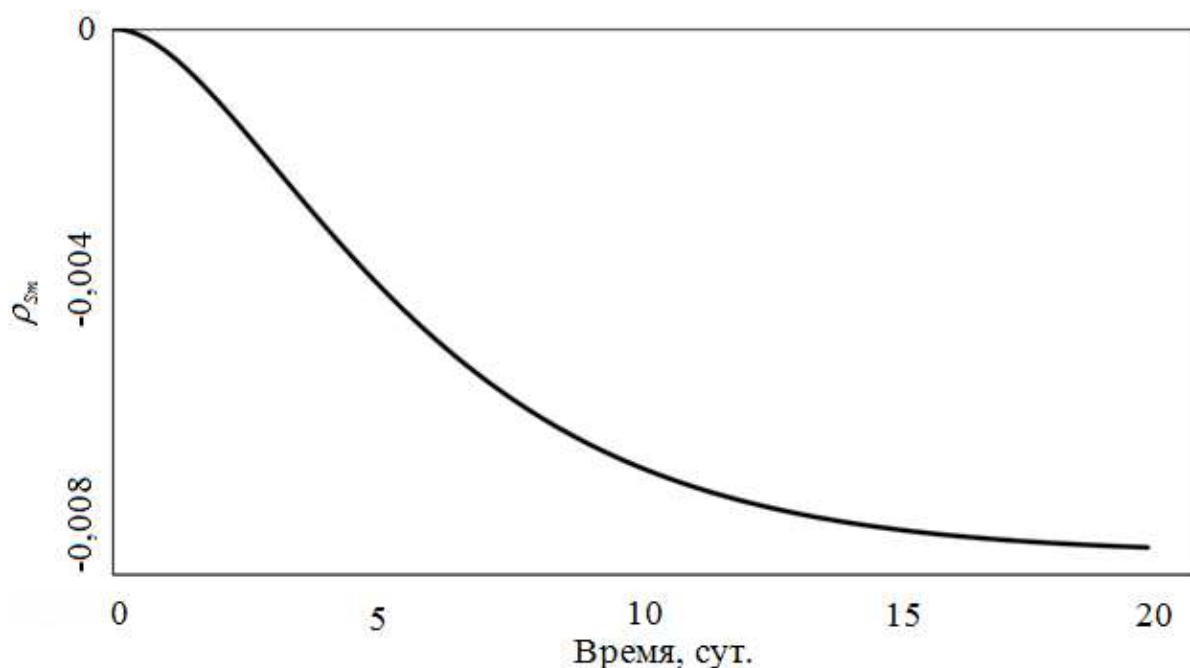


Рисунок 2.8.2.2 – Зависимость потери реактивности при отравлении Sm^{149} от времени

2.9 Расчет в программе WIMS-D5B

WIMS-D5B (Winfrith Improved Multigroup Scheme, версии D5B) это программа для расчета ядерного реактора, написанная на языке ФОРТРАН с использованием метода Монте-Карло.

В программе используется универсальная 69-групповая библиотека микроконстант, подготовленная на основе файлов оцененных нейтронных данных (ENDF, JEF, JENDL) в ГНЦ РФ ФЭИ.

Библиотека констант содержит 90 нуклидов. Для некоторых из них имеются по несколько наборов микроконстант, полученных по разным теоретическим моделям. Разные наборы констант имеются для водорода, бора, изотопов

Программа применяется для расчетов тепловых и быстрых реакторов. Она успешно применяется и для проектирования реакторов, и для расчетов и анализа различных эффектов в существующих реакторах [19].

2.9.1 Расчет «холодного» реактора

Схематическое изображение модели элементарной ячейки представлено на рисунке 2.9.1.1

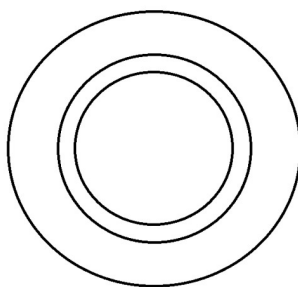


Рисунок 2.9.1.1 – Элементарная ячейка реактора в WIMS-D5B

В созданной расчетной модели элементарной ячейки реактора рассчитана кинетика изменения k_{∞} в зависимости от глубины выгорания. Для этого была задана мощность реактора 24 МВт/т(U). Полученные результаты представлены в таблице 2.9.1.1.

На основе этих результатов построен график зависимости реактивности от энерговыработки, который представлен на рисунке 2.9.1.2.

Таблица 2.9.1.1 – Результаты расчета холодного реактора

t, сут	Q, МВт·сут/тU	k_{∞}	ρ , %
2	48	1,260	20,612
20	480	1,220	18,013
100	2400	1,208	17,240
200	4800	1,183	15,452
300	7200	1,150	13,047
400	9600	1,120	10,741
500	12000	1,094	8,578
600	14400	1,070	6,530
700	16800	1,048	4,571
800	19200	1,028	2,683
900	24000	1,009	0,854
1000	26400	0,991	-0,917

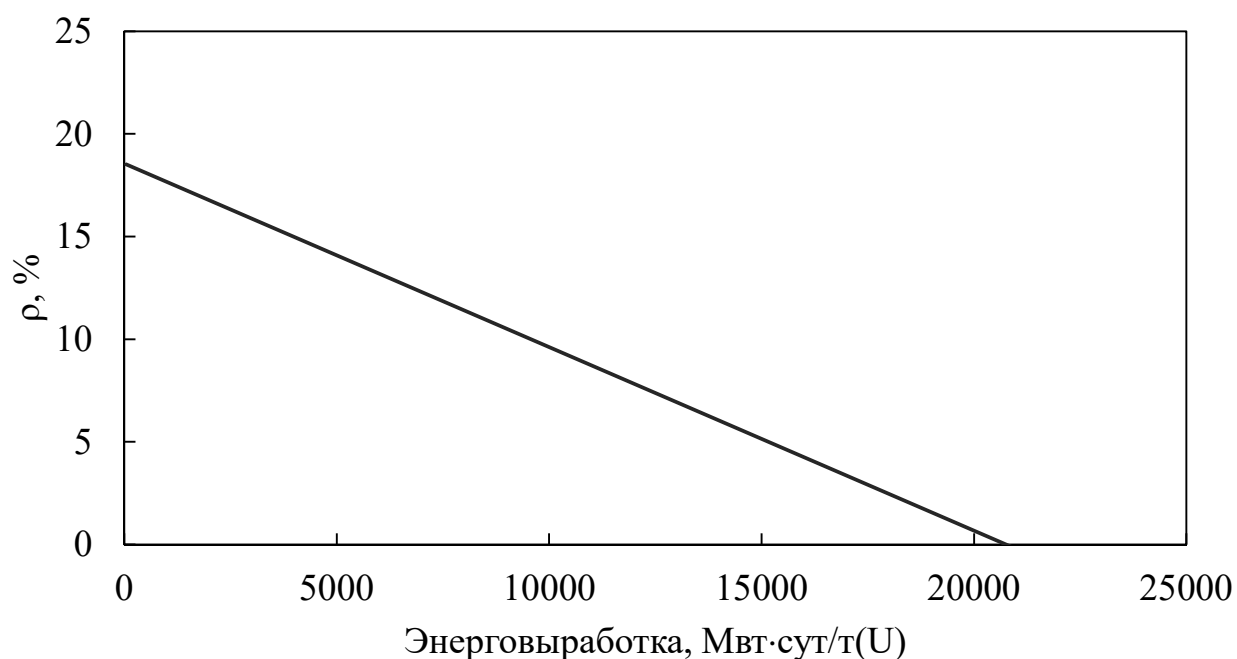


Рисунок 2.9.1.2 – Зависимость запаса реактивности от энерговыработки

Из полученного графика видно, что после нескольких первых суток с моменты работы реактора реактивность резко падает из-за отравления ксеноном, а также, что при энерговыработке 21200 МВт·сут/т(U) ячейка израсходовала весь запас реактивности. Длина кампании составила 890 эффективных суток. Темп потери реактивности равен 0,001 %/(МВт·сут).

Очевидно, что в процессе кампании происходит выгорание делящегося нуклида U^{235} и накопление изотопов Pu^{239} , которые в свою очередь являются делящимися [25]. На рисунках 2.9.1.3 – 2.9.1.5 представлены зависимости ядерной концентрации от энерговыработки следующих нуклидов: U^{235} , U^{238} , Pu^{239} и Pu^{241} соответственно.

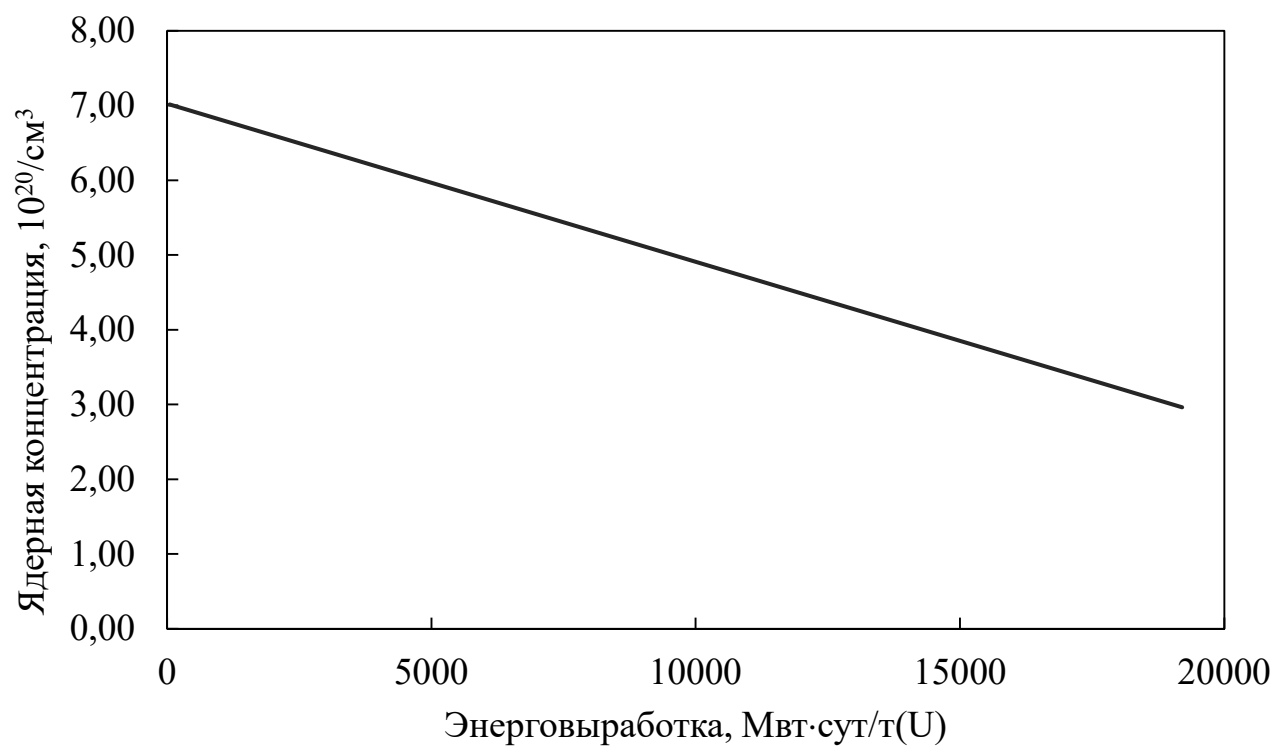


Рисунок 2.9.1.3 – Зависимость ядерной концентрации U^{235} от энерговыработки

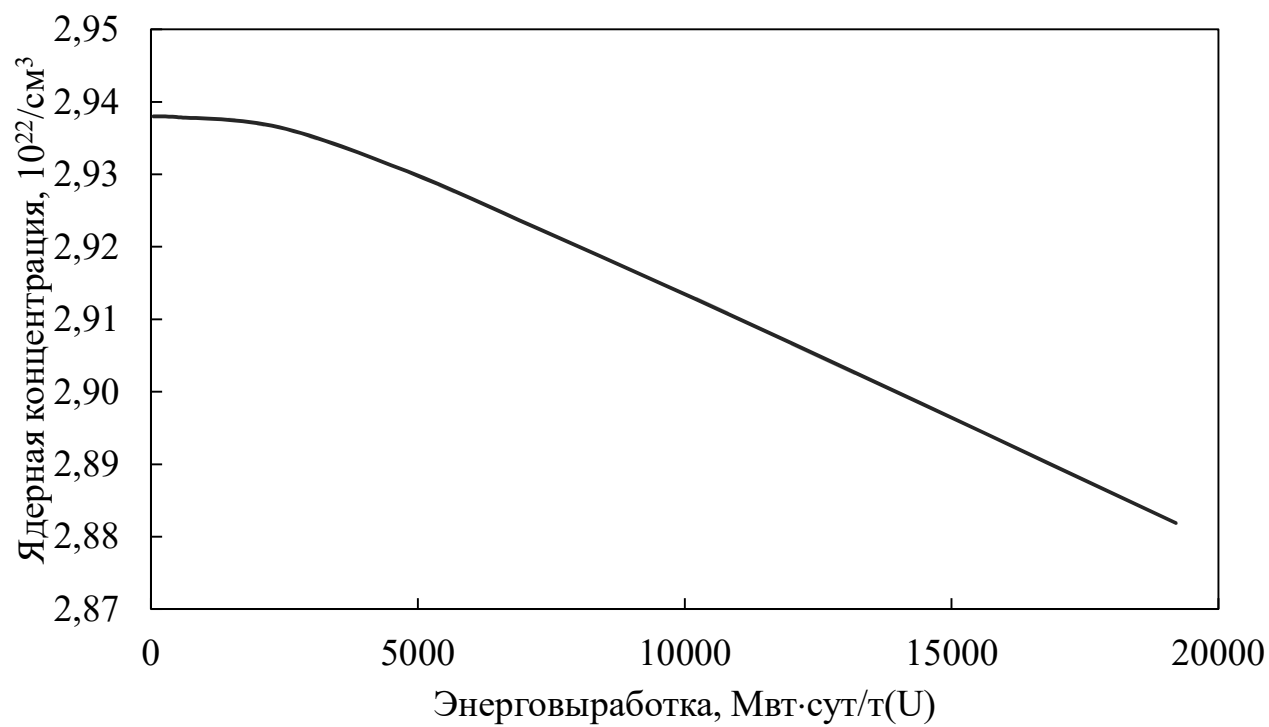


Рисунок 2.9.1.4 – Зависимость ядерной концентрации U^{238} от энерговыработки

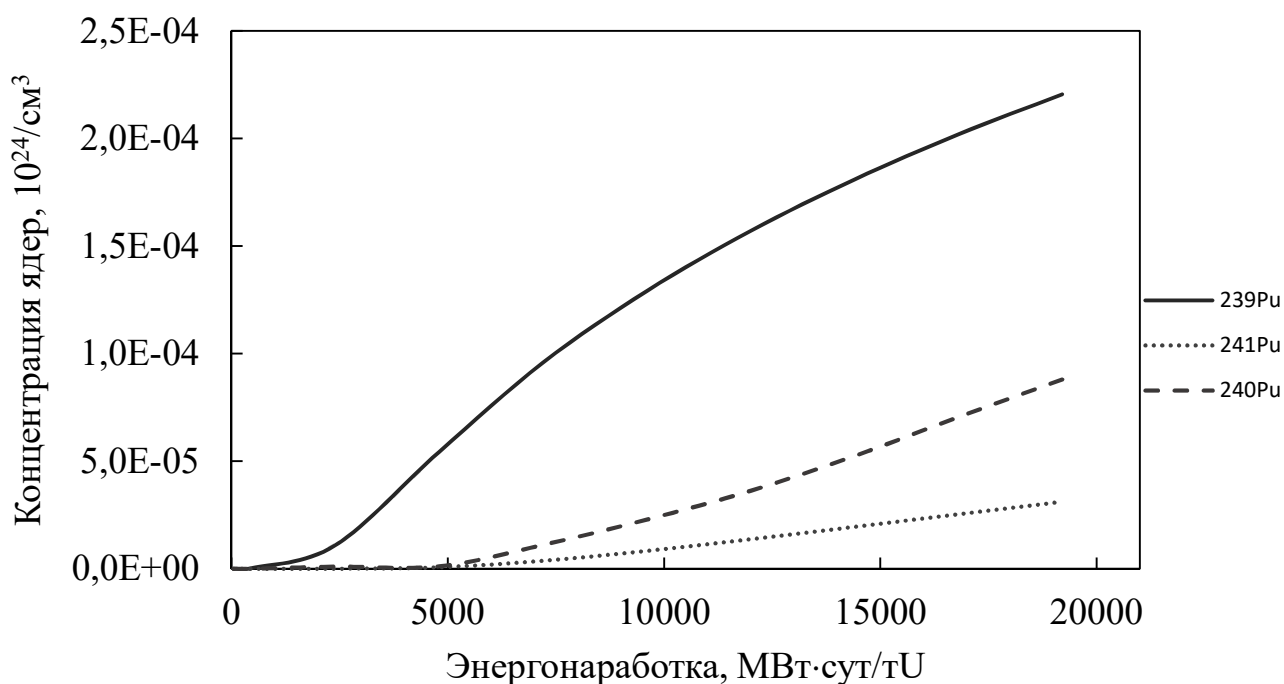


Рисунок 2.9.1.5 – Зависимость ядерной концентрации Pu^{239} , Pu^{240} и Pu^{241} от энерговыработки

Из графиков видно, что концентрации нуклидов U^{235} и U^{238} снижались в ходе кампании. Это связано с делением первого и радиационным захватом второго. Для изотопов Pu наблюдается обратная картина: все его изотопы накапливаются в ходе кампании. Это связано с тем, что нуклид U^{238} при захвате нейтрона претерпевает β^- и в ходе цепочки превращений переходит в нуклид Pu^{239} .

2.9.2 Расчет «горячего» реактора

Чтобы понять, как реактор ведёт себя при разогреве, произведен расчёт при рабочей температуре. Для этого были определены следующие температуры: температура топлива – 1000 К, температура оболочки – 600 К, температура теплоносителя и замедлителя – 573 К. Плотность теплоносителя при рабочей температуре равна 0,712 г/см³. Геометрия расчётной модели не претерпела

никаких изменений. На рисунке 2.9.2.1 представлена зависимость запаса реактивности от энерговыработки.

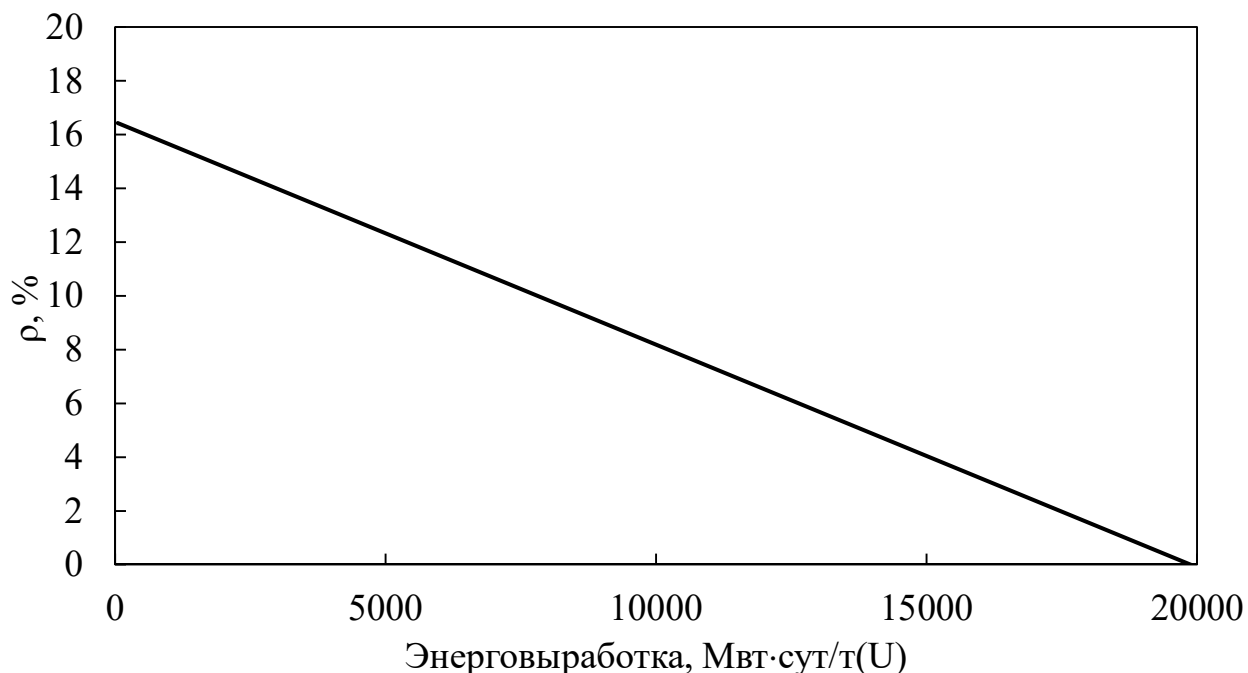


Рисунок 2.9.2.1 – Зависимость реактивности «горячего» реактора от глубины выгорания

Из графика видно, что максимальная энерговыработка составила 19700 МВт·сут/т(U), а длина кампании равна 820 эффективным суткам. Темп потери реактивности равен 0,00093 %/(МВт·сут).

Используя полученные значения реактивности для «холодного» и «горячего» реакторов был определен температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \rho_{гор} - \rho_{хол} = -2,41\%.$$

На рисунках 2.9.2.2 и 2.9.2.3 представлены спектры нейтронов в замедлителе и топливе соответственно.

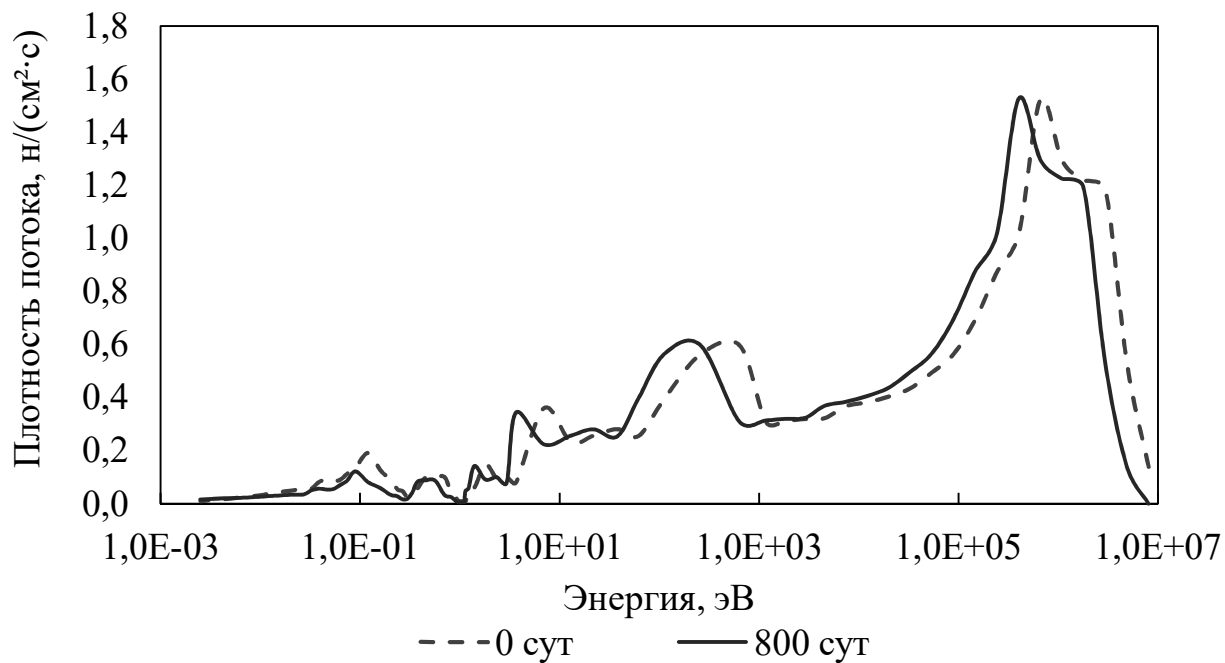


Рисунок 2.9.2.2 – Спектры нейтронов в замедлителе для исходной ячейки в начале и в конце кампании

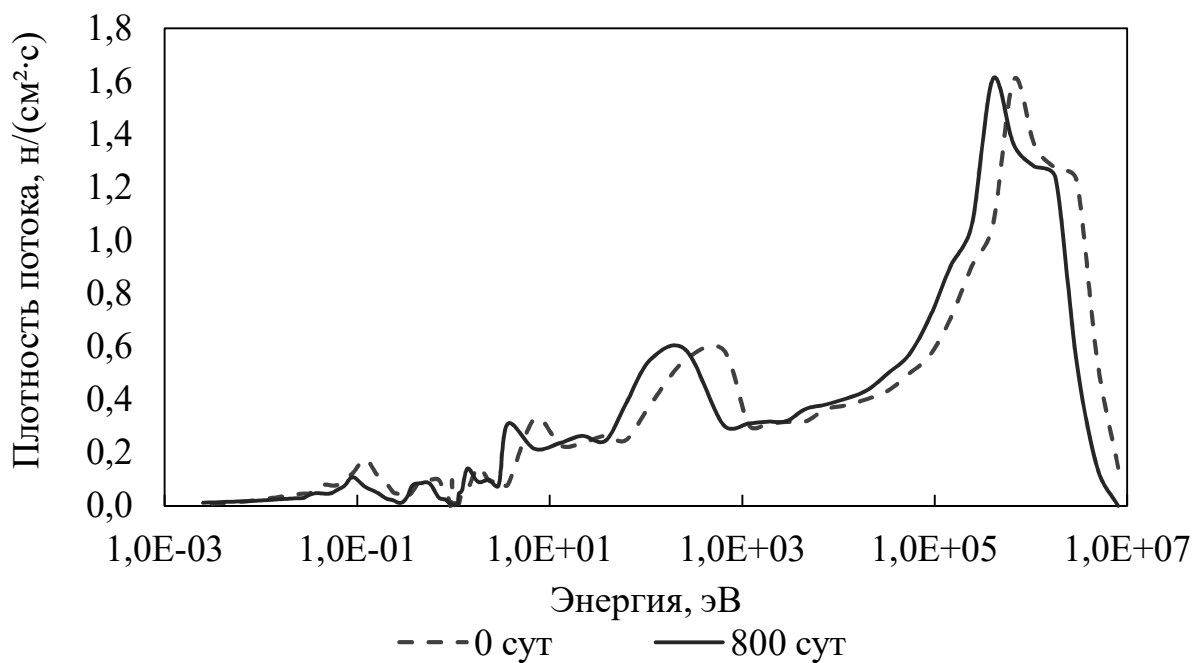


Рисунок 2.9.2.3 – Спектры нейтронов в топливе для исходной ячейки в начале и в конце кампании

Полученные результаты позволяют отметить, что спектры нейтронов в начале и конце кампании практически не изменяются. Заметные отличия можно отметить лишь в тепловой области.

2.9.3 Расчет гомогенного «горячего» реактора

Для расчёта использовалась двузонная модель, первая из которых содержит топливо, оболочку и теплоноситель с гомогенными концентрациями и размещением, вторая зона является замедлителем, окружающим фиктивный блок. На рисунке 2.9.3.1 представлена зависимость запаса реактивности от энерговыработки.

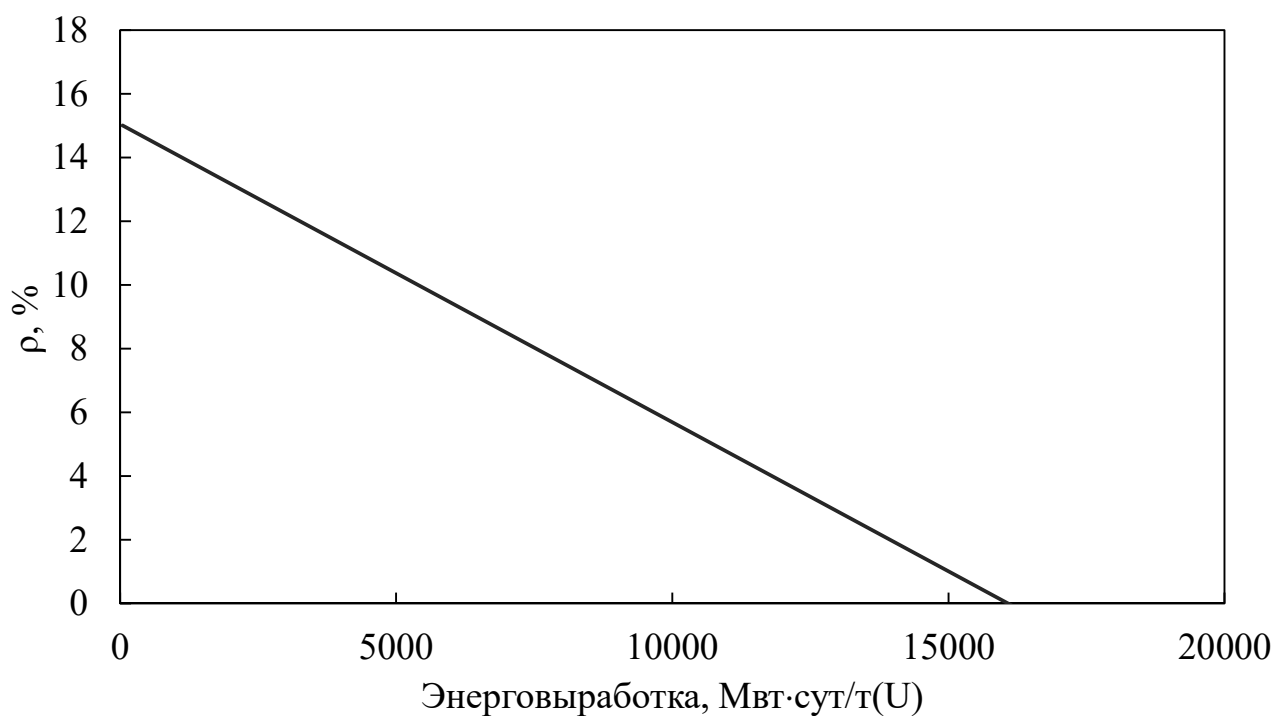


Рисунок 2.9.3.1 – Зависимость реактивности гомогенного «горячего» реактора от глубины выгорания

Очевидно, что гомогенизация приводит к изменению запаса реактивности, т.к. значительно меняются коэффициенты формулы четырёх сомножителей. Анализируя график, можно увидеть, что максимальная

энерговыработка составила 16100 МВт·сут/т(U), длина кампании 670 эффективных суток. Темп потери реактивности составил 0,0011 %/(МВт·сут).

Для оценки коэффициента воспроизводства вторичного топлива был проведен расчет зависимости изменения ядерной концентраций ^{239}Pu от изменения ^{235}U . В первом приближении коэффициент воспроизводства (KB) принят равным:

$$KB = \frac{dN_9}{dN_5} \approx \frac{\Delta N_9}{\Delta N_5}.$$

В результате расчетов была получена следующая зависимость (см. рисунок 2.9.3.2).

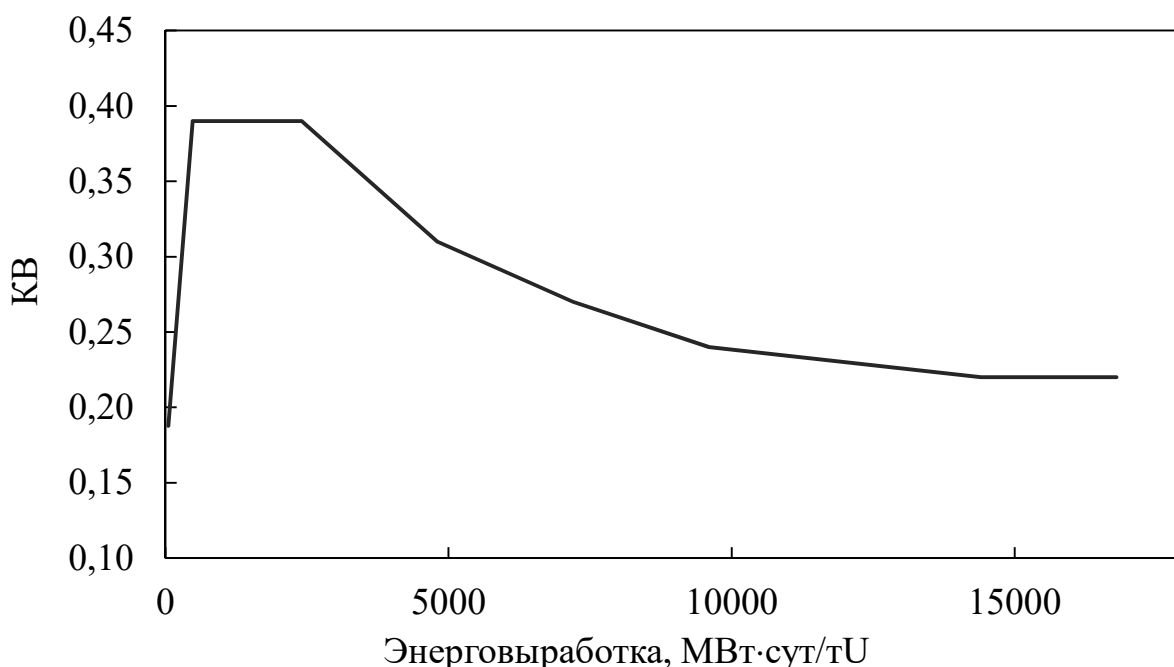


Рисунок 2.9.3.2 – Зависимость KB от энерговыработки в топливе

^{239}Pu в результате цепочки радиоактивных превращений после радиационного захвата нейтрона ядрами ^{239}U . Спустя некоторое время он накапливается в заметных количествах и начинает принимать участие в цепной реакции деления и начинает выгорать [26]. Поэтому по результатам данных расчетов можно оценить KB только на начальном участке полученной зависимости. В соответствии с рисунком 2.9.3.2, можно принять $KB = 0,39$.

Одно из преимуществ гомогенной ячейки заключается в том, что она позволяет на качественном уровне определить распределение плотности потока быстрых и тепловых нейтронов и энерговыделения в зависимости от радиуса расчётной модели.

На рисунке 2.9.3.3 представлено распределение быстрых и тепловых нейтронов по радиусу элементарной ячейки.

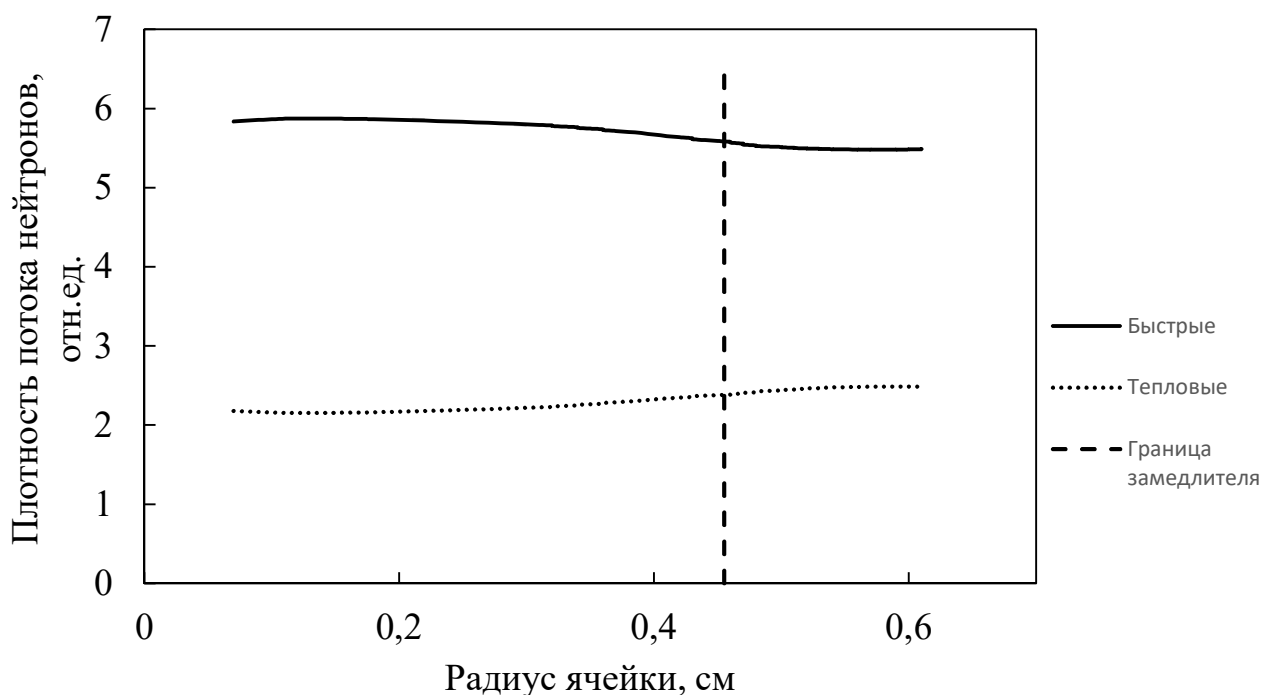


Рисунок 2.9.3.3 – Распределение быстрых и тепловых нейтронов по радиусу элементарной ячейки.

На графике видно, что при приближении к зоне замедлителя плотность потока быстрых нейтронов снижалась, а тепловых, напротив, повышалась. Это объясняется тем, что нейтроны, попадая в замедлитель, замедляются в нём и возвращаются обратно в фиктивный блок, т.к. сечение поглощения замедлителя мало.

2.10 Сравнение полученных данных

Чтобы проверить правильность расчетов, в таблице 2.10.1 приведена сравнительная таблица бесконечных коэффициентов размножения, рассчитанных разными методами.

Таблица 2.10.1 – Коэффициенты размножения в бесконечной среде, рассчитанные различными методами

Метод	«Холодный»	«Горячий»
Одногрупповой	1,109	1,089
WIMS-D5B	1,281	1,224
Отклонение % (относительно WIMS-D5B)	15,51	12,39

На основе полученных данных можно сделать вывод, что реализованный вручную одногрупповой расчет является менее точным по сравнению с многогрупповым, особенно для «холодного» состояния реактора, в котором отклонение превысило 15%.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела ВКР является комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов модернизации водо-водяного энергетического реактора ВВЭР в условиях современного рынка.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести планирование научно-исследовательской работы;
- провести анализ конкурентных технических решений;
- провести SWOT-анализ рассматриваемой установки;
- произвести расчёт бюджета научно-исследовательской работы;
- определить ресурсную эффективность исследования.

3.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Данный пункт представляет собой полный перечень проводимых работ, где определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным достаточно объективным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта [18]. Так как число исполнителей не превышает двух, предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные сведения о выполнении данной работы представлены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%

Продолжение таблицы 3.1.1

Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 20% И – 100%
Выбор исходных параметров	НР, И	НР – 100% И – 70%
Методика расчета	НР, И	НР – 100% И – 80%
Нейтронно-физический расчет ЯР	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

Как видно из представленной выше таблицы, роль научного руководителя в ходе выполнения всех видов работ сводится к направляющей и контролирующей функциям, когда как инженер является исполнительным звеном – он выполняет все поставленные задачи для достижения установленной цели.

3.2 Продолжительность этапов работ

Продолжительность этапов работ могут быть рассчитаны следующими двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый метод подразумевает наличие и использование соответствующей нормативной базы трудоёмкости всех применяемых в работе процессов, так как они по своей природе являются повторяющимися с достаточно высокой частотой

при условии стандартной, устойчивой обстановки. В связи с тем, что подобными нормативами исполнитель не обладает в виду нестандартности и неравномерности распределения рабочих усилий применяется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Способ с применением достаточно актуальных, как с точки зрения времени, так и со стороны реальной применимости аналогов к разрабатываемой НИР имеет ряд преимуществ: он относительно прост в исполнении и не сопряжён с большим количеством затрат. Однако на практике он может быть слишком локальным и применяться только для отдельных элементов – невозможно найти абсолютно идентичных работ.

Второй способ – экспертный – применим в ситуации, когда аналоги выполняемой НИР отсутствуют. Он предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию.

Для определения вероятных значений продолжительности работ $t_{ож}$ может применяться одна из двух формул.

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5} \quad (3.2.1)$$

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4t_{prob} + t_{max}}{6} \quad (3.2.2)$$

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, сут.;

t_{max} – максимальная продолжительность работы, сут.;

t_{prob} – наиболее вероятная продолжительность работы, сут.

Как видно из самой конструкции формул, вторая требует большего анализа каждого из элементов работы и вероятностной оценки их продолжительности, что, очевидно, усложняет все.

Для выполнения перечисленных в таблице 3.1 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель ВКР;
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни.

Расчёт продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях:

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}} \quad (3.2.3)$$

где $K_{\text{вн}}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ.

Расчёт продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}} \quad (3.2.4)$$

где $T_{\text{кал}}$ – календарные дни;

$T_{\text{вд}}$ – выходные дни;

$T_{\text{пд}}$ – праздничные дни.

При учёте, что $T_{\text{кал}} = 365$, $T_{\text{вд}} = 52$, $T_{\text{пд}} = 10$.

В приложении А приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоёмкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле 3.2.4. Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоёмкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента $K_{\text{д}} = 1,15$. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{\text{ож}} \cdot K_{\text{д}}$. Столбцы 8 и 9 – трудоёмкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на $T_{\text{к}} = 1,212$. Итог по столбцу 5 даёт общую

ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоёмкости для каждого из участников проекта. Величины трудоёмкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов, позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный в приложении Б.

3.3 Потенциальные потребители результатов исследования

Современные мировые тенденции определяют вектор развития любой технологической, научной и прочих отраслей. Особенно сильно поднимается вопрос о необходимости планирования и организации всех проводимых работ, а именно – с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Таким образом, существует потребность в определении затрат на проведение научно-исследовательских работ и их продолжительности, что, в свою очередь, определяет экономическую эффективность и конкурентоспособность рассматриваемой в данной научно-исследовательской работе ЯЭУ.

Полученные результаты различных, в том числе и нейтронно-физических, характеристик ЯЭУ в процессе расчёта данной работы определяют назначение исследуемого реактора как энергетический реактора для атомной станции. Потенциальные рынки для данного перспективного проекта:

- блоки средней мощности предназначены для энергоснабжения отдельных регионов России, развитых и развивающихся стран за рубежом, для которых не требуются блоки с большой мощностью и сильна зависимость от стоимости закупки или транспортировки углеводородного топлива.

- реактор может использоваться в составе атомных станций средней мощности для энергообеспечения городов и крупных промышленно-жилых районов, центров добычи и/или переработки нефти, производства сжиженного газа, горно-обогачительных комбинатов, опреснительных комплексов.

- развертывание в электросетях (альтернатива для замены небольших старых угольных электростанций);

– узкоспециализированное использование в изолированных или отдаленных районах, где нет необходимости создавать крупные генерирующие мощности, а электрические сети слаборазвиты или отсутствуют, и где неэлектрические продукты столь же важны, как и электричество.

Рынок услуг по разработке ЯЭУ можно сегментировать по множеству критериев, основными из которых являются уровень развития атомной энергетики страны и электрическая мощность установки (рисунок 3.3.1).

		Энергетическая мощность установки		
		До 440 МВт	От 440 МВт до 1000 МВт	От 1000 МВт до 1800 МВт
Уровень развития атомной энергетики	Высокий			
	Средний			
	Низкий			

Рисунок 3.3.1 – Карта сегментирования рынка услуг по ЯЭУ

Таким образом, необходимость для стран с низким развитием атомной энергетики ядерных установок с малыми и средними мощностями, говорит о том, что в стране энергетика в целом может быть, как на низком, так и на достаточно высоком уровне. Развитие атомной энергетики могло идти как параллельно развитию традиционной энергетики страны, так и опираясь на огромную базу развития.

3.4 Анализ конкурентных технических решений

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 3.4.1. В качестве конкурирующих ЯЭУ были приняты такие реакторные установки как: Р – РБМК-1000, Б – БН-800.

Именно российские разработки являются опорными в данном оценочном исследовании, так как именно отечественные разработки являются одними из наиболее востребованных на международном рынке, а непосредственно в России сооружение иных, зарубежных аналогов не представляется возможным.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 3.4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _В	Б _Р	Б _Б	К _В	К _Р	К _Б
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Модульность	0,13	5	3	5	0,65	0,39	0,65
2. Вес	0,06	5	4	3	0,30	0,24	0,18
3. Надежность	0,15	5	5	4	0,75	0,75	0,60
4. Уровень шума	0,01	4	4	4	0,04	0,04	0,04
5. Безопасность	0,22	5	4	4	1,10	0,88	0,88
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Стоимость топлива в зависимости от обогащения по изотопу U^{235}	0,05	4	5	3	0,20	0,25	0,15
2. Стоимость теплоносителя	0,03	5	5	3	0,15	0,15	0,09
3. Конкурентоспособность продукта	0,01	5	4	4	0,05	0,04	0,04
4. Степень готовности к реализации	0,03	4	5	3	0,12	0,15	0,09
5. Предполагаемый срок эксплуатации	0,12	5	4	5	0,60	0,48	0,60

Продолжение таблицы 3.4.1

6. Длительность топливного цикла	0,16	5	3	5	0,80	0,48	0,80
Итого	1	52	46	43	4,76	3,85	4,12

Предоставленные выше данные позволяют провести анализ конкурентоспособности и перспективности ЯЭУ, представленной в данной работе. Исходя из данных таблицы можно сделать вывод, что данная реакторная установка ВВЭР наиболее сбалансирована, имеет небольшие габариты и весьма востребована на рынке ядерной энергетики.

Можно отметить основной недостаток у одного из конкурентов РМБК-1000, а именно крупная ядерная катастрофа, в следствие которой было принято приостановить дальнейшую разработку и модернизацию ядерного реактора.

БН-800 в свою очередь является главным конкурентом из-за возможности наработки ядерного горючего и отсутствия замедлителя в активной зоне, но данный тип реактора на данный момент слабо востребован так как требует больших материальных ресурсов и физических экспериментов.

3.5 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ любого научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [19].

Сильными сторонами могут являться факторы, которые отражают наиболее конкурентоспособную сторону рассматриваемой установки.

Сильными сторонами данной ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности:

- использование воды в качестве замедлителя и теплоносителя;

- доступность и дешевизна воды и отработанные технологии ее получения;

- при разрывах в первом контуре радиоактивные элементы попадут в гермооболочку и не выйдут в окружающую среду.

- гермооболочка защищает реактор от внешнего воздействия;

Слабыми сторонами считаются те особенности рассматриваемого объекта, которые могут препятствовать его наиболее выгодному и беспрепятственному использованию.

Слабыми сторонами рассматриваемой ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности:

- невозможность замены топлива в работающем реакторе;

- первый контур находится под большим давлением, что потенциально может вызвать большой масштаб аварии при разгерметизации;

- коррозионная активность замедлителя и относительно высокие поглощающие свойства;

- неравномерное распределение энерговыделения из-за сильного замедления нейтронов в среде.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

К возможностям ЯЭУ можно отнести:

- снижение стоимости электроэнергии;

- предоставление дополнительных рабочих мест.

- расширения производства и мощностей.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды объекта, что может иметь

разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

К угрозам по отношению к рассматриваемому реактору можно отнести:

- природные катаклизмы;
- снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок;
- диверсионные и террористические действия.

В таблице 3.5.1 представлен SWOT-анализ в виде таблицы.

Таблица 3.5.1 – SWOT-анализ

	Сильные стороны: С1. Малые габаритные размеры. С2. Развитые свойства самозащищенности. С3.Доступность и дешевизна воды, а также отработанные технологии по ее получению; С4.Наличие высокой замедляющей способности, высокое энерговыделение с единицы объема.	Слабые стороны: Сл1. Использование высокообогащенного топлива. Сл2. Высокое давление при энергетически приемлемых температурах. Сл3. Коррозионная активность теплоносителя. Сл4. Для перегрузки топлива в реакторе требуется его остановка.
Возможности: В1. Возможность производства тепла и опреснения воды. В2. Предоставление дополнительных рабочих мест. В3.Расширение производства и мощностей для	1.Удачное совмещение конструкционных материалов в установке, обеспечивает надежную эксплуатацию и высокие показатели выработки электроэнергии. 2.Системы безопасности установки отвечают всем требованиям, которые	2.Большое сечение поглощения нейтронов водой требует увеличение обогащения ядерного топлива, что может увеличить стоимость электроэнергии; 3.Коррозионная активность и сильное взаимодействие с

обеспечения работоспособности ЯЭУ.	предъявляются к современным АЭС, 3. Увеличение привлекательности данной энергетической установки среди потенциальных стран заказчиков данного проекта.	металлическим топливом заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы.
Угрозы: У1. Природные катаклизмы. У2. Снижение государственного финансирования развития и ввода в эксплуатацию новых типов установок. У3. Террористические и диверсионные действия.	1. Преимущества ЯППУ ведут за собой привлечение действий террористического и диверсионного характеров. 2. Преимущества реактора перед конкурентами вызывает дополнительный интерес у государства.	1. Наличие высокого давления делает ЯППУ уязвимой перед природными катаклизмами. 2. Возникновение аварии сможет снизить интерес к проектам подобного рода.

Проведённый SWOT-анализ позволяет с достаточной для данной работы точностью определять дальнейшее положение рассматриваемого объекта на соответствующем рынке. ЯЭУ в связи с отличными характеристиками имеет достаточно устойчивые перспективы для использования в качестве источника электроэнергии. Наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности.

3.6 Расчёт накопления готовности проекта

Текущее состояние работы над проектом нуждается в оценке для точного понимания всех затраченных усилий. Получаемые по итогу подобной оценки величины (величины накопления готовности работы) отображают количество

процентов, на которое выполнен весь объём работ по проекту в целом по окончании текущего (i -го) этапа [19].

Введём некоторые обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$ – общая трудоёмкость проекта;
- TP_i (TP_k) – трудоёмкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;
- TP_i^H – накопленная трудоёмкость i -го этапа проекта по его завершении;
- TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоёмкость работ, выполняемых j -м участником на i -м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, в нашем примере $m = 2$.

Степень готовности определяется формулой (3.5):

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}} \quad (3.6.1)$$

Применительно к таблице, представленной в приложении А, величины TP_{ij} (TP_{kj}) находятся в столбцах (6, $j = 1$) и (7, $j = 2$). Величина $TP_{\text{общ}}$ равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов.

Пример расчета TP_i (%) и CG_i (%) на основе этих данных содержится в таблице 3.6.1.

Таблица 3.6.1 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	TP_i , %	CG_i , %
Постановка задачи	3,74	3,74
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	7,05	10,79
Подбор и изучение материалов по тематике	14,57	25,36
Разработка календарного плана	4,11	29,47
Обсуждение литературы	4,48	33,94
Выбор исходных параметров	12,69	46,64
Методика расчета	20,16	66,80
Нейтронно-физический расчет	17,08	83,87

Этап	ТР _i , %	СГ _i , %
Оформление расчетно-пояснительной записки	6,40	90,28
Оформление графического материала	3,74	94,01
Подведение итогов	5,99	100,00

Таким образом, наибольшее количество трудозатрат приложено на этапах подбора и изучения материала по тематике, проработки методики расчёта и при его непосредственном осуществлении, когда как этапы, включающие подбор и оформление различного рода документов, подготовку необходимой базы для проведения практических изысканий по отдельности потребовали меньше времени и сил.

3.7 Расчёт сметы на выполнение проекта

Смета на выполнение данного исследования содержит все расходы, необходимые для осуществления комплекса работ, необходимых для реализации всего спектра поставленных перед проектом задач. Расчёт полной (сметной) стоимости выполнения исследования производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

3.7.1 Расчёт затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки.

Кроме того, статья включает, так называемые, транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю.

Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (транзакции). Приблизённо они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 3.7.1.1.

Таблица 3.7.1.1 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	260	1 уп.	260
Картридж для принтера	1040	1 шт.	1040
Итого:			1300

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны:

$$C_{\text{МАТ}} = 1300 \cdot 1,05 = 1365.$$

Таким образом, затраты на материалы по разработке проекта расчета ядерного реактора составили 1365 рублей.

3.7.2 Расчёт заработной платы

Данная статья расходов подразумевает суммарную заработную плату научного руководителя и инженера (исполнителя), с учётом входящих в фонд заработной платы различных премий. Основная заработная плата рассчитывается, опираясь на трудоёмкость выполнения каждого этапа и на величину месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083} \quad (3.7.2.1)$$

где 25,083 – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей недели.

Пример расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.7.2.1. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из приложения А. Учёт всевозможных премий и районной надбавки осуществляется путём использования ряда коэффициентов: $K_{\text{пр}} = 1,3$; $K_{\text{доп.зп}} = 1,2$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{и}} = K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{доп.зп}} \cdot K_{\text{р}}; \quad (3.7.2.2)$$

$$K_{\text{и}} = 1,3 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 2,028.$$

Таблица 3.7.2.1 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{и}}$	Фон з/п, руб.
НР	35120	1400,15	17	2,028	48271,57
И	12130	483,59	26	2,028	25498,73
Итого:					73770,30

Как можно видеть из таблицы 3.7.2.1 значение фонда заработной платы, необходимое для осуществления работ, составило 73770,30 рублей.

3.7.3 Расчёт затрат на страховые взносы

Затраты на страховые взносы, включающие в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование согласно ФЗ от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, водится пониженная ставка – 30,2%:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,302 ; \quad (3.7.3.1)$$

$$C_{\text{соц}} = 73770,30 \cdot 0,302 = 22278,63 .$$

Таким образом, размер отчислений во внебюджетные фонды составили 22278,63 рублей. Данные взносы идут в Фонд государственного социального страхования (ФСС), Пенсионный фонд (ПФ) и Фонд медицинского страхования (ФФОМС).

3.7.4 Расчёт затрат на электроэнергию

Данные расходы подразумевают затраты на то количество электроэнергии, которая потрачена для выполнения всего проекта, то есть на работу используемого оборудования. Они рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (3.7.4.1)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $C_{\text{э}} = 5,748$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования рассчитывается на основе суммарной трудоёмкости работ из приложения А для исполнителя ($T_{\text{рд}}$) при условии, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (3.7.4.2)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, определяется самостоятельно.

В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об}}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_c, \quad (3.7.4.3)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности $K_c = 1$.

Расчёт затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 3.7.4.1.

Таблица 3.7.4.1 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{об}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{об}}$, кВт	Затраты $C_{\text{эл.об}}$, руб.
Персональный компьютер	192	0,3	331,1
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			332,25

Из таблицы 3.7.4.1 видно, что по результатам расчетов затраты на электроэнергию составили 332,25 рублей.

3.7.5 Расчёт амортизационных расходов

Данная статья подразумевает расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (3.7.5.1)$$

где $H_{\text{А}}$ – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{Д}}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{\text{ОБ}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Например, для ПК в 2020 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне, $F_{\text{Д}}$ равен:

$$F_{\text{Д}} = 298 \cdot 8 = 2384.$$

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

$H_{\text{А}}$ определяется как величина обратная СА, в данном случае это:

$$H_{\text{А}} = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{0,4 \cdot 208 \cdot 100000 \cdot 1}{2384} = 3489,93.$$

Таким образом, сумма амортизационных расходов составила 3489,93 рублей.

3.7.6 Расчёт прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражаются расходы на выполнение проекта, которые не могут быть учтены в предыдущих статьях или же которые не могут быть предвидены.

Их следует принимать равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{СОЦ}} + C_{\text{ЭЛ.ОБ}} + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,1. \quad (3.7.6.1)$$

Прочие расходы в нашем случае:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (1365 + 73770,30 + 22278,63 + 332,25 + 3489,93) \cdot 0,1 = 10123,61.$$

Таким образом, сумма прочих расходов составила 10123,61 рубля.

3.7.7 Расчёт суммарной себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Определение топливной кампании ядерного топлива реактора ВВЭР» (таблица 3.7.7.1).

Таблица 3.7.7.1 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма	
		, руб.	, %
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	1365,00	1,23
Основная заработная плата	$C_{\text{ЗП}}$	73770,30	66,25
Страховые взносы	$C_{\text{СОЦ}}$	22278,63	20,01
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$	332,25	0,30
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	3489,93	3,13
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	10123,61	9,09
Итого:		111359,72	100,00

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 111359,72$ руб. Проведение анализа вклада каждой из статей в суммарные затраты на работу выявило, что основной вклад вносят отчисления на заработную плату участников

проекта, когда как расходы на материалы и обеспечение электроэнергией практически не повлияли на финальную величину.

3.7.8 Расчёт прибыли

Ввиду отсутствия данных, прибыль G рассчитана как 20% от полной себестоимости проекта:

$$G = C \cdot 0,2; \quad (3.7.8.1)$$

$$G = 111359,72 \cdot 0,2 = 22271,94.$$

Таким образом, прибыль от реализации расчета составит 22271,94 рубль.

3.7.9 Расчёт НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (3.7.9.1)$$

$$\text{НДС} = (111359,72 + 22271,94) \cdot 0,2 = 26726,33.$$

В результате расчета сумма НДС составила 26726,33 рублей.

3.7.10 Цена разработки проекта

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (3.7.10.1)$$

$$C_{\text{НИР}} = 111359,72 + 22271,94 + 26726,33 = 160357,99 \text{ руб.}$$

Таким образом, по результатам проведенных вычислений, цена разработки проекта составила 160357,99 рублей.

3.7.11 Оценка экономической эффективности проекта

Ввиду закрытости или отсутствия данных по данной ЯЭУ оценка экономической эффективности и определение срока окупаемости данного проекта невозможно.

4 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Расчет нейтронно-физических характеристик ядерного реактора ВВЭР тепловой мощностью 1000 МВт проводился на рабочем месте под воздействием вредных и опасных производственных факторов. В дальнейшем, был проведен анализ и выявлены пути снижения вредного и опасного воздействия на студента при работе на ПЭВМ.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

4.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

Для работников атомной промышленности существуют специальные нормы трудового законодательства такие как:

- быть постоянно готовыми к предупреждению и ликвидации аварийных ситуаций;
- прибыть незамедлительно на работу по вызову работодателя или уполномоченного им лица для предотвращения развития аварии или ликвидации ее последствий;
- знать и соблюдать требования Федерального закона, других федеральных законов, федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии;
- соблюдать установленный порядок хранения документов, ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, обеспечивать защиту и сохранность сведений;

4.1.2 Организация рабочего места исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 4.1.2.1.

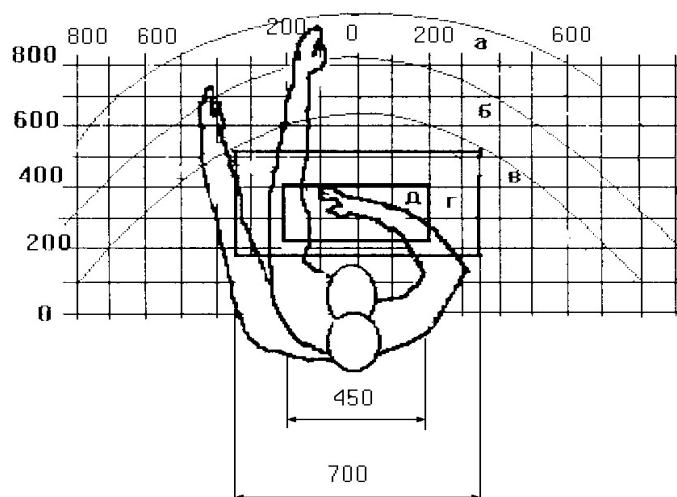


Рисунок 4.1.2.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони;
- г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация: в зоне в (слева), легкой досягаемости ладони находится литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680 - 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног

высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм [20].

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 - 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем [20].

Монитор должен быть расположен на уровне глаз студента на расстоянии 500 - 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана [21]. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана [21]:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами [21].

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов).

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 4.2.1.1.

Таблица 4.2.1.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы». СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.1.004-91.
2. Воздействие ВЧ, УВЧ, СВЧ излучений и т.д.	+	+	+	
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	-	-	-	
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи.	+	+	+	

На студента, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия вредных факторов на исследователя

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещении должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция [22].

Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. приведены в таблице 4.2.2.1.

Таблица 4.2.2.1 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
-------------	-----------------	----------------------------	--------------------------------

Продолжение таблицы 4.2.2.1

Холодный и переходный	23 - 25	40 - 60	0,1
Теплый	23 - 25	40	0,1

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20 - 25°C, зимой – 13-15 °C [22].

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ [22].

При работе с компьютером использовался монитор, дисплей модуль которого изготовлен из жидкокристаллической матрицы.

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более [22]:

- в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

4.2.3 Электробезопасность

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Несчастные случаи, связанные с опасным воздействием электрического тока на организм человека, происходят при соприкосновении человека с токоведущими частями или же от действия разрядного тока при приближении к токоведущим частям на достаточное для образования разряда расстояние.

Механизм поражения электрическим током весьма сложен и еще недостаточно изучен.

Действие электрического тока на организм человека может быть тепловым (ожоги), механическим (разрыв тканей, растрескивание костей), химическим (электролиз), и биологическим (нарушение функций нервной системы и управляемых ею процессов в живом организме).

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, токоведущих частей).

4.3 Экологическая безопасность

Воздействие АЭС на окружающую среду при соблюдении технологии строительства и эксплуатации может и должно быть значительно меньше, чем других технологических объектов: химических предприятий, ТЭЦ. Однако радиация в случае аварии – один из опасных факторов для экологии, человеческой жизни и здоровья. В этом случае выбросы приравняются к возникающим при испытании ядерного оружия.

На территории расположения станции по выработке электроэнергии и за ее пределами следует предусматривать возникновение таких негативных влияний:

- изъятие земельного участка под строительство;
- изменение рельефа местности;
- уничтожение растительности из-за строительства;
- загрязнение атмосферы при необходимости взрывных работ;
- переселение местных жителей на другие территории;
- тепловое загрязнение, влияющее на микроклимат территории;

Для минимизации воздействия АЭС на окружающую территорию, природные ресурсы и людей проводится комплексный радиоэкологический мониторинг.

Основные пути снижения вредных и опасных производственных факторов на АЭС:

- реализация глубокоэшелонированной многобарьерной защиты в системе распространения радиоактивных веществ;
- применение технических систем, обеспечивающих преодоление нарушений нормальной эксплуатации;
- использование систем управления и контроля процессов и контроля радиационной обстановки;
- обязательная очистка загрязненных сбросов и выбросов, недопущение неконтролируемых выбросов в окружающую среду.

В нормальных условиях эксплуатации радиационное заражение и влияние ионизирующего излучения сведены к минимуму и не превышают допустимый природный фон. Катастрофическое воздействие АЭС на окружающую среду и людей может возникнуть при авариях и утечках.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

4.4.1 Чрезвычайные ситуации на АЭС

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

К источникам ЧС техногенного происхождения причисляют происшествия, представляющие собой угрозу для нормальной жизни людей, их имущества, объектов народного хозяйства, окружающей среды. К подобным ЧС относятся взрывы, пожары, аварии, утечка опасных веществ.

Уже на стадии проектирования АЭС рассматривается широкий спектр проектных аварий, которые характеризуются достаточно низкой частотой возникновения и преодолеваются с учетом консервативного подхода в части работы систем, предназначенных для преодоления аварий.

При всех режимах нарушений нормальной эксплуатации параметров реакторной установки (РУ) типа ВВЭР-1000 не должны превышать следующие установленные пределы безопасной эксплуатации:

- эксплуатационный предел;
- предел безопасной эксплуатации по качеству и величине дефектов;
- для сохранения целостности границ давления первого контура;
- для сохранения целостности границ давления второго контура;
- температура среды в помещениях гермообъема не должна превышать;

Одна из самых наиболее типичных аварий – это авария, связанная с нехваткой теплоносителя или вывода из строя ГЦН. Но на такие случаи существуют запроектные аварии, в ходе которых, весь персонал действует по строго указанному плану и устраняет все последствия ЧС.

4.4.2 ЧС на рабочем месте исследователя

При проведении исследования наиболее типичной ЧС является возникновение пожара в рабочей зоне.

Согласно нормативным документам, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в пожарно-спасательную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение

В результате проделанной работы для заданного реактора типа ВВЭР тепловой мощностью 1000 МВт было выполнено следующее:

- выполнен предварительный расчет реактора: определены размеры активной зоны и скорость прокачки теплоносителя, равна 4,41 м/с, что соответствует установленным требованиям;
- проведен расчет концентраций элементов активной зоны и гомогенизация элементарной ячейки;
- проведен расчет микроскопических и макроскопических сечений элементов активной зоны;
- проведен расчет коэффициента размножения нейтронов для бесконечной среды $k_{\infty} = 1,109$;
- проведен расчет эффективного коэффициента размножения нейтронов $k_{эф} = 1,083$;
- проведена оптимизация параметров ячейки по шагу расстановки ТВЭЛов и внешнему радиусу топливного блока, выбраны оптимальные размеры ячейки, которым соответствует $k_{\infty} = 1,3145$;
- проведен расчет «горячего» состояния реактора в одnogрупповом приближении, где были пересчитаны $k_{\infty} = 1,089$ и $k_{эфф} = 1,071$;
- температурный эффект реактивности $-1,1\%$;
- температурный коэффициент реактивности $-4,52 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;

Также был проведен многогрупповой расчёт в программе WIMS-D5B и получен коэффициент размножения нейтронов для бесконечной среды $k_{\infty} = 1,281$ для «холодного» состояния и $k_{\infty} = 1,224$ для «горячего». Температурный эффект реактивности составляет $-2,41\%$. Температурный коэффициент реактивности $-9,37 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Ввиду закрытости данных относительно характера применения результатов данной разработки, оценка её экономической эффективности, в частности определение срока окупаемости данного проекта объективно невозможна в рамках представленной работы.

В ходе выполнения работы были проведены обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.

Список использованной литературы

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ88/97. ПНАЭ Г-01-011-97. М., 1997. – [С. 20-21].
2. Бойко В.И. и др. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие /Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 77 с.
3. Колпаков Г.Н., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах. Часть I: Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 1997. – 99 с.
4. Конышин В. А. Ядерно-физические константы делящихся ядер: Справочник. – М., Энергоатомиздат, 1984. – 457 с.
5. Савандер В.И., Увакин М.А. Физическая теория ядерных реакторов: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 93 с.
6. Владимиров, В.И. Физика ядерных реакторов: практические задачи по их эксплуатации / В.И. Владимиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 216 с.
7. Широков С. В. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с различными выгорающими поглотителями /. Заец В. В – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, 2013. – 148 с.
8. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 83 с.
9. Определение эффективной температуры топлива реактора на тепловых нейтронах: Методические указания к выполнению индивидуального домашнего задания / сост. А.В. Кузьмин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 84 с.
10. Колпаков Г. Н. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Селиваникова О. В. – Томск: Издво Томского политехнического университета, 2009. – 102 с.

11. Острейкин В. А. Эксплуатация атомных станций: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
12. Наймушин А. Г. Методические указания к лабораторно-практической работе / Ю. Б. Чертков. – Томск.: НИ ТПУ, 2011. – 77 с.
13. Гурачевский, В.Л. Введение в атомную энергетику. Чернобыльская авария и её последствия / В.Л. Гурачевский. – Минск: институт радиологии, 2014. – 176 с.
14. Тепломассообменное оборудование ТЭС и АЭС: учебное пособие / В.А. Суслов, В.Н. Белоусов, С.В. Антуфьев, Е.Н. Громова, А.Н. Кузнецов, В.А. Кучмин, С.Н. Смородин. – Спб.: СПбГТУРП, 2015 – 83 с: ил.
15. Безопасность атомных станций: справочник. М., – Париж: EDF – Росэнергоатом, 2014. – [С. 104-109].
16. Определение эффективной температуры топлива реактора на тепловых нейтронах: Методические указания к выполнению индивидуального домашнего задания / сост. А.В. Кузьмин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 39 с.
17. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 [Электронный ресурс] – Режим доступа URL: http://elib.biblioatom.ru/text/andrushechko_aes-s-reaktorom-vver-1000_2010/go,0/ – Заглавие с экрана – (Дата обращения: 03.04.2020)
18. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие/ И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 30 с.
19. Конотопский, В.Ю. Методические указания к выполнению раздела «Финансовый менеджмент, Ресурсоэффективность и ресурсосбережение» магистерских диссертаций для всех специальностей ИК: Учебно-методическое пособие / В.Ю. Конотопский – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 33 с.
20. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»

[Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.

21. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.

22. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.

23. WIMSD5, Deterministic Multigroup Reactor Lattice Calculations. NEA-1507/04. OECD, NEA Data Bank, France, 2004. – 55 с.

24. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя во входном участке ТВС. / Дмитриев С.М., Добров А.А., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 3. С. 103-109.

25. Сборник нормативных материалов по безопасности АЭС. М.: Энергоатомиздат., 1985. – 16 с.

26. Балаковская АЭС. Блок № 1. / Отчет по углубленной оценке безопасности: учеб. пособие / Балаково, 2013. – 47 с.

27. Балаковская АЭС. Энергоблок № 2. / Техническое обеспечение безопасности сооружения и эксплуатации. Корректировка 2. Книга 2 /Балаково, 2013. – 75 с.

28. Тепловыделяющая сборка ТВСА ВВЭР-1000: направления развития и результаты эксплуатации Кандалов В. Б., Преображенский Д. Г., Романов А. И., Самойлов О. Б., Фальков А. А., Шишкин А. А. – М., Энергоатомиздат, 2014. – 323 с.

29. Определение эффективной температуры топлива реактора на тепловых нейтронах: Методические указания к выполнению индивидуального домашнего задания / сост. А.В. Кузьмин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 75 с.

30. Таблетка ядерного топлива с покрытием (ее варианты), способ нанесения покрытия и установка для осуществления способа: патент Рос. Федерация № 2131626, заявл. 20.04.2017, опубл. 13.03.2006, Бюл. № 3 – 17 с.

Приложение А

(обязательное)

Таблица А.1 – Микроскопические и макроскопические сечения всех элементов

Материал	Величина									
	σ_a , б	σ_f , б	σ_s , б	μ_s	σ_{tr} , б	Σ_a , см ⁻¹	Σ_s , см ⁻¹	Σ_{tr} , см ⁻¹	ξ	$\xi\Sigma_s$, см ⁻¹
U ²³⁸	1,990	—	9,000	—	10,990	0,048	0,216	0,264	0,084	0,002
U ²³⁵	502,29	428,01	15,000	—	517,29	0,221	0,007	0,228	0,085	0,00006
H ₂ O	—	—	—	—	—	0,016	2,040	1,771	0,510	1,035
O _{топливо}	—	—	3,750	0,040	3,600	—	0,184	0,176	0,120	0,022
O _{замедлитель}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Zr	0,137	—	8,000	0,010	8,060	0,006	0,344	0,3472	0,022	0,008

Приложение Б
(обязательное)

Таблица Б.1 – Макроскопические сечения элементов после гомогенизации 1 вида

Материал	Величина				
	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$
U ²³⁸	0,016	—	0,072	0,088	0,001
U ²³⁵	0,074	0,063	0,002	0,076	—
H ₂ O	0,008	—	1,041	0,901	0,526
O _{топливо}	—	—	0,061	0,059	0,007
O _{замедлитель}	—	—	—	—	—
Zr	0,001	—	0,046	0,046	0,001

Таблица Б.2 – Макроскопические сечения элементов фиктивного блока после гомогенизации 2 вида

Материал	Величина				
	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$
U ²³⁸	0,032	–	0,143	0,175	0,001
U ²³⁵	0,146	0,125	0,004	0,151	–
H ₂ O	0,017	–	2,100	1,810	1,062
O _{топливо}	–	–	0,121	0,117	0,015
O _{замедлитель}	–	–	–	–	–
Zr	0,001	–	0,091	0,092	0,002

Приложение В

(обязательное)

Таблица В.1 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	1	2	1,40	1,61	0	1,95	0
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,40	2,76	0,28	3,35	0,34
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	3	6	4,20	1,45	4,83	1,76	5,85
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,40	1,61	0,16	1,95	0,19
Обсуждение литературы	НР, И	1	2	1,40	0,32	1,61	0,58	1,95
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	2	4	2,80	3,22	2,25	3,90	2,73
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	3	6	4,2	4,83	3,86	5,85	4,68
Расчет принципиальной схемы устройства	И	4	10	6,40	0	7,36	0	8,92
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	2	3	2,40	0	2,76	0	3,35
Оформление графического материала	И	1	2	1,40	0	1,61	0	1,95
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,40	0,97	1,61	1,18	1,95
Итого:				29,40	16,93	26,33	20,52	31,91

Приложение Г (обязательное)

Таблица Г.1 – Линейный график работы

Этап	НР	И	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42
1	1,95	0														
2	3,35	0,34														
3	1,76	5,85														
4	1,95	0,19														
5	0,58	1,95														
6	3,90	2,73														
7	5,85	4,68														
8	0	8,92														
9	0	3,35														
10	0	1,95														
11	1,18	1,95														

НР –

И –

Приложение Д
(обязательное)

CELL 6
SEQUENCE 1
NGROUP 69
NMESH 18
NMATERIAL 3 2
NREGION 4
PREOUT
INITIATE
ANNULUS 1 0.07 0
ANNULUS 2 0.3765 1
ANNULUS 3 0.455 2
ANNULUS 4 0.669 3
MESH 3 5 5 5
MATERIAL 1,-1,300.,1,2235.,.0009382592,8238.,.0222680178 \$
6016,0.046317037
MATERIAL 2,-1,300.,2,91.,.042586,93.1.,.0004303
MATERIAL 3,-1,300.,3,3001.,.06691,6016.,.03346
S 32
BEGINC
BEGINC
POWERC 1, 24,100,1 *100
BEGINC
BEGINC
POWERC 1, 24,100,1 *200

BEGINC
BEGINC
POWERC 1, 24,100,1 *300
BEGINC
BEGINC
POWERC 1, 24,100,1 *400
BEGINC
BEGINC
POWERC 1, 24,100,1 *500
BEGINC
BEGINC
POWERC 1, 24,100,1 *600
BEGINC
BEGINC
POWERC 1, 24,100,1 *700
BEGINC
BEGINC
POWERC 1, 24,100,1 *800
BEGINC
BEGINC